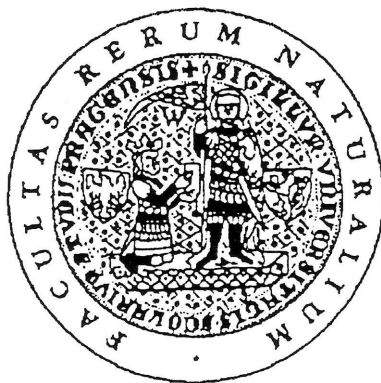


**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Fyzická geografie a geoekologie



RNDr. Theodor Fiala

**Vývoj nedostatkových objemů a průměrných a malých průtoků
v České republice**

Evolution of deficit volumes and mean and low flows in the Czech Republic

Disertační práce

Školitel: ing. Josef Hladný, CSc.

Konzultant: RNDr. Ivan Sládek, CSc.

Praha, 2011

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 15.2.2011

Podpis

Poděkování patří především ing. Josefu Hladnému, CSc., za veškerou pomoc a podnětné připomínky při vedení disertační práce.

Dále bych rád poděkoval Českému hydrometeorologickému ústavu a Výzkumnému ústavu vodohospodářskému T.G.Masaryka, v.v.i., v kterých jsem měl možnost se zapojit do grantových projektů týkajících se tématu disertační práce. Velký dík patří prof. Tahovi Ouardovi za jeho odborné rady a vytvoření příjemného prostředí při stáži v Institut national de la recherche scientifique v Québecu. Zvláštní poděkování patří mé ženě Aničce za její trpělivost a povzbuzení při dokončování práce.

Obsah

Abstrakt	4
Abstract	5
1 Úvod	6
2 Struktura práce	9
3 Obsah článků	10
4 Výsledky a diskuze	16
4.1 Výběr nového normálového období.....	16
4.2 Trendy průměrných průtoků.....	18
4.3 Trendy malých vod.....	20
4.4 Období výskytu malých vod v roce.....	23
4.5 Výběr období ve vztahu k výsledkům.....	25
4.6 Vztah minim k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí.....	26
4.7 Budoucí vývoj vodnosti	28
5 Literatura	30
6 Seznam zkratk a výrazů	37
7 Prohlášení spoluautorů upřesňující autorský podíl na uvedených publikacích	38
8 Články 1 – 6	39
ČLÁNEK 1: Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. (32 stran)	
ČLÁNEK 2: Hydrologické charakteristiky řad průměrných denních průtoků na českých tocích – výběr nového období a srovnání s dosud používaným obdobím 1931–80. (9 stran)	
ČLÁNEK 3: Statistical Characteristics and Trends of Mean Discharges of Period 1961–2005. (8 stran)	
ČLÁNEK 4: Dopady změny klimatu na minimální průtoky. (8 stran)	
ČLÁNEK 5: Evolution of low flows in the Czech Republic. (13 stran)	
ČLÁNEK 6: Variabilita nedostatkových objemů na českých tocích ve vztahu k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí. (4 strany)	

Abstrakt

Práce se zabývá vývojem odtoku vody v České republice v posledních desetiletích se speciálním zaměřením na hydrologické sucho. V úvodu přináší podrobnou rešerši literatury na téma sucho, jeho typy, příčiny a následky. Zahrnut je také seznam nejpoužívanějších metod kvantifikace sucha a přehled prací zabývajících se dosavadními změnami vodnosti u nás i v Evropě a predikcí jejího budoucího vývoje.

V další části práce popisuje výběr období pro výpočet nových hydrologických charakteristik M-denních průtoků, které vydává Český hydrometeorologický ústav. Období 1931–80 se začalo jevit jako již zastarávající, a proto vznikl požadavek na výběr nového. Na základě různých statistických testů bylo nakonec vybráno období 1961–2005. Toto období bylo následně testováno na trendy průtoků a to jak průměrných ročních, tak průměrných měsíčních. Trendy ročních průtoků nevykázaly významný posun. Naopak u jednotlivých měsíců byly zjištěny signifikantní trendy, a to rostoucí u zimních měsíců a klesající u jarních, což koresponduje s výsledky jiných studií, které se zabývaly odtokem ve střední Evropě. Období 1961–2005 bylo později znovu změněno a v současnosti platné nové normálové období je 1981–2010.

Po analýze průměrných průtoků došlo na práci s charakteristikami hydrologického sucha za období 1961–2005. Hodnoty byly vybrány z roků, které začínaly 1. dubnem a končily 31. březnem roku následujícího. Tento specifický hydrologický rok má tu výhodu, že je u něj malá pravděpodobnost rozdělení období sucha do dvou let, neboť období přelomu března a dubna je typické zvětšenými průtoky v důsledku jarního tání. U každé ze 144 stanic byl identifikován režim ročního minima a podle něj byly stanice rozděleny na horské a nížinné. Testovány byly trendy ročních, letních a zimních sedmidenních minim, roční počty dnů s průtoky pod Q_{330} a Q_{355} a nedostatkové objemy vymezené stejnými prahovými hodnotami. Data letních a zimních minim byla zkoumána kvůli potenciálním posunům do dřívější nebo pozdější části roku. Testování proběhlo standardním a modifikovaným Mann-Kendallovým testem trendu.

Poslední část práce pojednává o deficitních objemech a jejich vztahu k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí. Vztah byl zkoumán na hodnotách nedostatkových objemů pod průtokem Q_{330} , na průměrných ročních sumách dnů s průtokem pod Q_{330} a na koeficientech variace těchto dvou proměnných.

Abstract

The presented work deals with the evolution of river flows in the Czech Republic in the last few decades with a focus on hydrological drought.

It starts with a detailed review of literature that concerns drought, its types, causes and impacts. It includes a list of the most frequently used methods of drought quantification and a review of papers on past and future trends of flows in the Czech Republic and Europe.

Further, it describes how a new period for the evaluation of hydrological characteristics, which have been issued by the Czech Hydrometeorological Institute, were selected. The period of 1931–1980 has become out of date and the selection of a new period was requested. Following a number of statistical tests, the period of 1961–2005 was selected. The new period was evaluated regarding the trends of mean annual and monthly discharges. Mean annual flows did not show significant shifts. On the contrary, significant trends were found in mean monthly flows. Increasing trends in discharges of winter months and decreasing trends in spring months correspond with results of other studies which dealt with flows in Central Europe. The period of 1961–2005 was later reviewed and the current norm is 1981–2010.

After the evaluation of mean flows, the characteristics of hydrological drought were analysed. Annual figures were derived from a period that began on 1st April and ended on 31st March of the following year. This specific hydrological year has the advantage that there is a small probability that one drought period will be split in two years. March and April are typical for high flows due to the snowmelt. At each of the 144 water-gauging stations, seasonality of low flows was assessed. Groups of summer (low-land) and winter (mountain) stations were formed according to the low-flow season. Annual, summer and winter minima as well as the annual number of days with discharges under Q_{330} and Q_{355} and deficit volumes were tested for trends in the period of 1961–2005. Dates of occurrences of summer and winter minima were examined for potential shifts to occur earlier or later in the year. Tests were performed by using the standard and modified Mann-Kendall trend test.

Finally, relations of low flows and physical-geographical characteristics of river catchments were examined. Correlations between deficit volumes, mean annual numbers of days with discharge under Q_{330} threshold and geographical characteristics such as land-use were evaluated.

1 Úvod

Po ničivých povodních, které v nedávných letech několikrát zasáhly Českou republiku, se pozornost hydrologů a vodohospodářů logicky zaměřila na tento hydrologický extrém. Katastrofální rozvodnění byla vyhodnocována z hlediska svých příčin, periodicity, extremity a následků. Nakupení povodňových případů, které se vyskytly v posledních 15 letech, vedlo k domněnce, že žijeme v období povodňového neklidu. Povodně proto pravděpodobně i nadále zůstanou hlavním přírodním rizikem naší země. Přitom je však třeba zabývat se i dalšími přírodními extrémy, které způsobují velké škody na našem území. Jsou jimi především sucho a vichřice. Příkladem mohou být třeba kompenzace zemědělcům po suchu v roce 2000, které dosáhly 5 mld Kč, což je částka srovnatelná se škodami z povodní, které na jaře roku 2010 zasáhly Moravu.

Předkládaná práce je z velké části zaměřena na hydrologické sucho. Sucho, jímž intuitivně rozumíme nedostatek vody, je termín velmi široký a obtížně vymezitelný. Je nutné jej vždy vztáhnout k určitému místu, časovému úseku a hospodářskému sektoru (nebo k části hydrologického cyklu), pro který sucho analyzujeme. Obvykle se rozlišují základní čtyři typy sucha: meteorologické, hydrologické, agronomické a socio-ekonomické. Prvotní příčinou je vždy **sucho meteorologické**. Meteorologové a klimatologové jím myslí druh počasí vyznačující se malým množstvím a frekvencí srážek a vysokým potenciálním výparem. Po určité době jeho trvání přichází nedostatek vody pro rostliny a ubývá vody v řekách. Nastává **sucho agronomické** a po něm **sucho hydrologické** vyznačující se minimálními vodními stavy a zaklesnutím hladin podzemních vod. Pokračující nedostatek vody přináší omezení dodávek pitné vody, její zdražování, zmenšování zemědělských výnosů a zpomalení hospodářství vůbec. Za těchto podmínek dochází k **socio-ekonomickému suchu**.

Sucha měla na člověka v minulosti dopad možná ještě větší než povodně, neboť byla pravděpodobnou příčinou stěhování národů nebo třeba zániku mayské civilizace (Peterson, Haug 2005). Celosvětově je dnes ohroženo suchem a desertifikací asi 1,2 mld lidí. Především v Africe hrozí kvůli nedostatku vody celá řada konfliktů např. mezi Senegalem a Mauretánií o vodu hraniční řeky Senegal, mezi Ghanou a Burkínou Faso o vodu z řeky Volta nebo mezi státy u jezera Čad o pozemské hranice vznikající na vyschlém dně mizícího jezera Čad (Niasse 2005).

Stejně jako povodně byl i jejich hydrologický „protipól“ od nepaměti sledován a zaznamenáván. V historických kronikách proto můžeme najít záznamy o vyschlých řekách, neúrodě, úhynu dobytka a požárech. Za nejstarší zprávu o suchu v Česku je považován zápis v Kosmově kronice k roku 1121, kdy „veliká sucha trvala celé tři měsíce – od března do května“ (Munzar 2004). Z dalších výjimečně suchých období stojí za zmínku roky 1590, 1616 a 1790, kdy se vyskytly extrémně nízké vodní stavy nejen na tocích v Čechách, ale také v sousedním Německu a Polsku. Nejvýraznějším suchem 19. století bylo období 1855–1875, kdy naše území postihly tři pěti- až sedmileté epizody. Velké srážkové deficity byly následovány mimořádnými poklesy průtoků na Labi v Děčíně. Toto sucho zasáhlo i okolní země, takže došlo např. k vyschnutí Neziderského jezera na rakousko-maďarském pomezí, což se od té doby nikdy nestalo (Němec, Kopp ed. 2009).

Sucha 20. století je možné díky existenci naměřených dat o teplotách vzduchu, srážkách, průtocích, vydatnostech pramenů apod. vyhodnocovat z různých pohledů. Z meteorologického pohledu analyzovali vývoj suchých období například Brázdil et al. (2009). Využili přitom často používané indexy sucha kombinující údaje o srážkách a teplotě vzduchu, jako jsou například Palmerův index PDSI (Palmer Drought Severity Index) nebo index SPI (Standardized Precipitation Index). Z období 1861–2006 byly identifikovány jako nejsušší periody třicátá léta, konec čtyřicátých a začátek padesátých let, přelom osmdesátých a devadesátých let 20. století a začátek 21. století.

Jak bylo zmíněno, hydrologická sucha přicházejí v souvislosti se suchy meteorologickými, a proto výše uvedený výčet such meteorologických do značné míry odpovídá také obdobím, kdy vodními toky protékalo podnormální množství vody. Výrazně se do historie zapsalo sucho na začátku třicátých let 20. století. Z povodí Labe tehdy mezi březnem 1933 a lednem 1935 otekla jen polovina obvyklého množství vody. V povodí Moravy bylo sucho dokonce tříleté, začalo v únoru 1932 a odtok dosáhl pouhých 44 % dlouhodobého průměru (Vorel 1937). Následovalo relativně vlhké období, které bylo ukončeno dvěma velkými suchy v letech 1947 a 1954. Po nich nastoupilo dvacetileté období o průměrné vlhkosti, které bylo přerušeno suchými roky, zejména 1974 a 1984. Několik suchých let po sobě přišlo na přelomu osmdesátých a devadesátých let a poslední velké sucho zasáhlo zemi v roce 2003 (Trnka et al. 2008). V tomto roce kromě nedostatku srážek umocnily sucho i vysoké teploty vzduchu. Od ledna do září spadlo na většině území republiky méně než 60 % průměrného úhrnu a odchylka teploty od normálu přesáhla 2 °C. Agronomické sucho postihlo prakticky

všechny zemědělsky využívané oblasti ČR. Tolasz et al. (2004) vyhodnotili rozdíl mezi srážkami a potenciální evapotranspirací (tzv. základní vláhovou bilanci) a v době kulminace sucha dospěli k deficitu 200 mm, lokálně až 400 mm. Možný (2004) vypočetl dobu opakování sucha roku 2003 zhruba na 150 let.

Agronomickým suchem se v České republice zabývá především Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd (VÚMOP). Množství potřebné závlahové vody použili jako indikátor agronomického sucha ve své práci Spitz a Hemerka (2005). Brázdil et al. (2009) prokázali negativní závislost výnosů jarního ječmene na velikosti sucha vyjádřeného Palmerovým Z-indexem.

Následkem meteorologického, agronomického a hydrologického sucha je sucho socio-ekonomické. Tento extrém nastává, když aktivity lidské společnosti převýší svými nároky na vodu disponibilní zásoby vody a deficit vody se projeví v různých oblastech národního hospodářství. Problémy mohou nastat v energetice, kdy poklesnou dodávky energie z vodních elektráren. Tepelné a jaderné elektrárny mohou být postiženy při odběru vody na chlazení, neboť vody může být při suchu v řekách málo a navíc může být příliš teplá a tudíž pro chlazení nevhodná.

Sucho roku 2003 způsobilo v Evropě škodu za 10 mld EUR. Horká vlna přispěla k úmrtí 40 000 osob, především ve Francii. Zavřeny byly některé elektrárny v Nizozemsku, neboť teplota vody v řekách stoupla nad 28 °C a nebylo ji možné použít pro chlazení. Některé úseky na Labi a Dunaji byly po určitou dobu nesplavné kvůli nízkému stavu vody. Zemědělská produkce EU poklesla o 11 %. Lesní požáry zničily 650 000 ha lesů v Portugalsku, Španělsku, Francii a Itálii (Rebetez et al. 2006, Tallaksen, van Lanen eds. 2004).

Tento přehled a aktuální požadavky hydrologické praxe ovlivnily do značné míry náplň předkládané práce. Rozsáhlá rešerše (viz článek 1) byla hlavní částí zprávy projektu vedeného Výzkumným ústavem vodohospodářským T.G.Masaryka, který se zabýval variabilitou sucha v podmínkách klimatické změny v ČR. Článek 2 vznikl díky výzkumu, jehož cílem bylo vybrat nové normálové období pro výpočet hydrologických charakteristik v Českém hydrometeorologickém ústavu (ČHMÚ). Některé výsledky ostatních článků byly rovněž použity v grantech řešených v rámci výzkumu ČHMÚ.

Cíle práce lze shrnout do následujících bodů:

- Zpracovat komplexní rešerši o suchu, jeho definicích, typech, příčinách a následcích, metodách kvantifikace, výskytu v minulosti a predikci budoucího vývoje.
- Zhodnotit celorepublikový vývoj vodnosti v posledních několika desetiletích a srovnat vývoj průměrných průtoků s vývojem malých průtoků.
- Podrobně analyzovat výskyt malých průtoků na českých tocích, jejich trendy a sezonalitu.
- Přispět k výzkumu nedostatkových objemů, jejichž režim je málo probádaný.
- Identifikovat vztah mezi hydrologickým suchem a fyzicko-geografickými charakteristikami povodí.

2 Struktura práce

Disertační práce sestává ze šesti článků, které byly publikovány v recenzovaných časopisech, sbornících z hydrologických konferencí a výzkumných zprávách. Témata článků jsou doplněna a propojena hodnotící syntézou, která sleduje motivy disertační práce. Články jsou seřazeny za sebou tematicky.

1. NOVICKÝ, O., KAŠPÁREK, L., FRIDRICHOVÁ, R., MRKVIČKOVÁ, M., HORÁČEK, S., FIALA, T., BRZÁKOVÁ, J., KOURKOVÁ, H., TREML, P., VACULÍK, M. (2008): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Úkol VÚV T.G.M. 2051, zpráva za rok 2008, VÚV T.G.M., Praha, 57 s.
2. FIALA, T. (2006): Hydrologické charakteristiky řad průměrných denních průtoků na českých tocích – výběr nového období a srovnání s dosud používaným obdobím 1931–80. In: Zborník príspevkov z 18. konference mladých hydrologov. SHMÚ, Bratislava, ISBN 80-88907-56-X, 9 stran.
3. FIALA, T. (2008): Statistical Characteristics and Trends of Mean Discharges of Period 1961–2005. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 56, č. 2, SAV, Bratislava, str. 133–140.
4. KULASOVÁ, B., BOHÁČ, M., FIALA, T. (2008): Dopady změny klimatu na minimální průtoky. Sborník z Workshopu Adolfa Patery 2008 – Extrémní hydrologické jevy v povodí. ČVUT, Praha, ISBN 978-80-02-02113-1, 8 s.

5. FIALA, T., OUARDA, T., HLADNÝ, J. (2010): Evolution of low flows in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 393, Elsevier, Amsterdam, str. 206–218.
6. FIALA, T. (2009): Variabilita nedostatkových objemů na českých tocích ve vztahu k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí. *VTEI*, 51, mimoř. č. 2009, VÚV T.G.M., Praha, str. 16–19.

3 Obsah článků

Článek 1 je rešerší 123 informačních zdrojů (odborných článků, výzkumných zpráv a knih) na téma sucho, snažící se postihnout veškeré jeho aspekty. Hned v úvodu se upozorňuje na rozdíly mezi suchem, ariditou a dezertifikací. Sucho je na rozdíl od aridity vždy vlastností přechodnou, v běžném stavu se vyskytuje vody dostatek. Dezertifikací rozumíme dlouhodobý proces přeměny ekosystému v poušť. Kapitola „Definice sucha“ popisuje problém vytvoření jednotné definice sucha. Obecnou definici, že se jedná o nedostatek vody, je nutné konkretizovat z hlediska místa, času a účelu.

Důležitou částí článku je kapitola o typech sucha. Prvotní příčinou je vždy sucho meteorologické, tj. nedostatek srážek a vysoký potenciální výpar. K jeho zhoršení přispívají další meteorologické prvky, jako jsou především teplota a vlhkost vzduchu. Na něj bezprostředně navazuje sucho agronomické, které přichází ve chvíli, kdy půda neposkytuje dostatek vláhy rostlinám a kdy se nedostává vody chovaným zvířatům. Absence srážek se následně projeví snížením povrchového odtoku a klesajícími hladinami stojatých vod - vzniká hydrologické sucho. Nejdrív se projeví v povrchových a později v podzemních vodách. Důsledkem předchozích dějů je sucho socio-ekonomické, které přichází, když lidské aktivity svými nároky převyšují množství vody, které je k dispozici.

Příčiny sucha mohou být různé, vždy se však jedná o důsledek odchylky počasí od běžného stavu a vždy souvisí s nedostatkem srážek. Srážky se nedostaví z nejrůznějších důvodů: setrvání blokujících anticyklón v Evropě, neobvyklý posun intertropické zóny konvergence v Africe, absence srážek v jihovýchodní Asii v souvislosti s fenoménem El Niño apod. Na tuto kapitolu logicky navazuje popis následků sucha. Dopady se mohou projevit jak ve fyzicko-geografické (ekosystémy), tak v socio-ekonomické (zásobování vodou, energetika, zemědělství aj.) části krajinné sféry.

Pro potřeby vědeckého výzkumu je nutné sucho kvantifikovat. Článek proto přináší popis metod výpočtu sucha, a to od nejjednodušších indexů, které využívají pouze data o srážkových úhrnech, až po ty komplexní, které kromě srážek zohledňují množství sněhu v povodí, průtok, zásobu vody v nádržích nebo množství vody v půdě. Na tuto část logicky navazuje rozbor metod, které se používají pro vyhodnocování kvantifikovaných charakteristik sucha. Je diskutováno o využití čáry překročení průměrných denních průtoků, indexu odvozeného z ročních minim, o možnosti odvození hodnot z regionalizace, způsobech analýzy nedostatkových objemů a délek jejich trvání a nově o objevující se metodě regionálního hodnocení sucha.

Závěrečná kapitola se zabývá vývojem celkové vodnosti v evropském i českém měřítku v minulosti a predikcemi budoucího vývoje. Dosavadní trendy vypovídají o zmenšování srážek a potažmo odtoku v oblasti Středomoří (viz např. Todorovic 2007, Brunetti et al. 2004) a opačném trendu ve Skandinávii (Hisdal et al. 2007). Ve střední Evropě se srážkové úhrny a průměrné roční průtoky vyvíjejí poměrně nevýrazně (např. Degirmendžić et al. 2004, Brázdil et al. 2009). Dochází ovšem ke zvyšování teploty vzduchu, což ovlivňuje odtok a zvyšuje pravděpodobnost výskytu hydrologického sucha. Zmenšení průtoků na Slovensku dokládají Majerčáková et al. (1997) a Miklánek et al. (2007).

Klimatické scénáře předpovídají pro Evropu zvýšení teploty vzduchu na celém kontinentu, zvýšení srážek v západní a severní Evropě a snížení na jihu a východě kontinentu. Obecně by měly trendy průtoků kopírovat trendy srážek. Odlišnosti se vyskytnou například v oblastech bohatých na sníh a led, kde je očekáváno zvětšení průtoků v zimě a zmenšení v létě (např. Ohmura et al. 1995). Dankers et al. (2007) se zabývali předpovědí vývoje průměrných ročních sedmidenních minim. Autoři došli k závěru, že by se změna minimálních průtoků měla do značné míry podobat vývoji průměrných průtoků, tedy že minima by se měla zmenšovat na jihu Evropy (až o 40 %) a naopak zvětšovat na severu.

V článku jsou na závěr diskutovány i vlivy land-use a land-cover na odtok. Změna využití krajiny bezpochyby mění odtok velmi významně. Typ vegetace působí na vlhkost a teplotu vzduchu, intercepci, potenciální evapotranspiraci a hloubku kořenové zóny, což následně ovlivňuje skutečnou evapotranspiraci a množství srážkové vody, která infiltruje nebo odteče přímo (Tallaksen, van Lanen eds. 2004).

Článek 2 je zaměřen na výběr období pro výpočet nových hydrologických charakteristik M-denních průtoků. Tato úloha vyplynula z potřeby poboček ČHMÚ,

jejichž zkušenost z jednání s odběrateli hydrologických dat ukázala, že uživatelská sféra považuje charakteristiky vypočítané z období 1931–80 již za zastaralé. Tím vznikl požadavek na výpočet nových hydrologických charakteristik.

Při výběru několika období, na kterých měla být před finálním rozhodnutím provedena statistická srovnání, byly zohledněny studie, které doporučovaly vybrat období dlouhé 40 až 50 let, a tedy neprotahovat dosud používané období (Kašpárek et al. 1999). Proto bylo navrženo ke zvážení období 1961–2000 (shodné s obdobím používaným na Slovensku), a dále jiné čtyřicetileté období 1966–2005. Srovnání bylo provedeno na datech z 89 vodoměrných stanic. Rozdíly v dlouhodobých průměrných průtocích i v koeficientech variace byly malé, ovšem překvapivě bylo zjištěno, že období začínající rokem 1961 vykazuje vyšší rozkolísanost než období pozdější, které zahrnovalo hydrologicky extrémní roky 2002 a 2003. První polovina šedesátých let se z hlediska odtoku ukázala být velmi rozkolísaná. Vyskytly se v ní jak suché roky 1963 a 1964, tak extrémně vodný rok 1965. Hydrologové z ČHMÚ tyto roky ve výpočtech nových hydrologických charakteristik nechtěli opomenout, a proto bylo za nové normálové období vybrán časový úsek 1961–2005.

Období 1961–2005 („nové“) pak bylo z různých pohledů srovnáváno s obdobím 1931–1980 („starým“). Bylo vybráno 50 stanic s nepřerušenu řadou průměrných denních průtoků a na těchto datech se analyzovaly změny M-denních vod, průměrných průtoků a variace. Dlouhodobé průměrné průtoky se téměř nezměnily: oproti „starému“ období se snížily o 1,3 %. Rozdíly o více než 10 % byly zjištěny pouze na čtyřech stanicích, přičemž k některým přispělo antropogenní ovlivnění. Změny koeficientů variace kolísaly v rozmezí ± 20 %. V průměru počítaném ze všech 50 stanic se variace snížila o 3 %, což je pravděpodobně důsledek výstavby vodních nádrží v průběhu „nového“ období. Jednou z funkcí přehradních nádrží je nalepšování malých a zmenšování velkých průtoků a tudíž snižování rozkolísanosti odtoku.

Funkce nádrží se projevila také na změnách hodnot malých M-denních průtoků. Nalepšování průtoků v období sucha je dobře identifikovatelné. Například hodnota průtoků Q_{355d} na Vltavě v Praze vzrostla o 54 %.

Článek 3 přináší další výsledky analýz odtoku nově zvoleného normálového období 1961–2005. V úvodu je stručně zmíněn postup výběru nového období a srovnání s dosud používaným obdobím 1931–1980. Následuje kapitola o analýze trendů, které byly testovány testem trendu obsaženým ve statistickém softwaru CTPA (Change and Trend Problem Analysis). Byly vybrány stanice, ve kterých průtoky

nebyly, nebo byly jen velmi málo, ovlivněné lidskou činností. Výběr, konzultovaný s pobočkami ČHMÚ, vyústil v soubor 65 stanic z celé republiky. Výsledky byly rozděleny do kategorie „rostoucí“ a „klesající“ trend; kategorie „bez trendu“ nebyla vymezena. Z 65 stanic byl rostoucí trend zaznamenán u 34, klesající u 31, statisticky významná však byla jen časová řada na stanici Klášterec nad Orlicí. Z mapového vyjádření vyplynula převaha rostoucích trendů na západě a severu republiky a naopak klesajících na jihu a východě.

Testy trendů průměrných měsíčních průtoků přinesly velmi odlišné výsledky. V prvních třech měsících roku převládaly stanice s rostoucími průtoky. V období od dubna do června se trend zcela obrátil a dominovaly stanice s klesajícími průtoky. Extrémním měsícem se stal červen, v kterém byl statisticky významný trend poklesu průtoků zjištěn u 49 % vodoměrných stanic. Od září do prosince se na českých tocích signifikantní trendy téměř nevyskytly. Na případech července a srpna autor upozorňuje, jak jedna jediná extrémní hodnota ovlivňuje trend celé řady. Na Moravě jsou červencové trendy rostoucí, v Čechách nikoliv. Naopak pro srpen vyšly trendy rostoucí v Čechách a na Moravě převládaly poklesy. Je to důsledek extrémní hodnoty v důsledku červencových povodní na Moravě (rok 1997) a srpnových v Čechách (rok 2002).

Článek 4 se kromě průměrných průtoků podrobně zabývá problematikou minimálních průtoků. Jedním z jeho cílů bylo odvodit charakteristiky minimálních průtoků za období 1961–2005. Autoři článku diskutují čáry překročení M-denních průtoků stanovené z denních průměrných průtoků a z řad denních průtoků vyrovnaných klouzavými průměry za 7 dní. Průměrný nárůst M-denních vod z řad vyrovnaných klouzavými průměry je následující: u průtoků Q_{330} o 9 %, u Q_{355} o 11 % a u Q_{364} o 18 %. Největší nárůst vykazaly Cidlina, Rožnovská a Vsetínska Bečva, tedy řeky, jejichž variabilita průměrných denních průtoků je jedna z největších v České republice.

V další fázi byly z dat období 1961–2005 odvozeny N-leté minimální průtoky s trváním 7 dní pro doby opakování od 2 do 100 let. Řady ročních minim byly vybrány z období, které začínalo 1. dubnem a končilo 31. březnem následujícího roku. Tento specifický hydrologický rok byl v dizertační práci uplatňován v drtivé většině případů, kdy se analyzovala minima nebo nedostatkové objemy. Jeho výhoda je zřejmá – období přelomu března a dubna je typické zvětšenými průtoky v důsledku jarního tání a je u něj proto malá pravděpodobnost rozdělení období sucha do dvou let. Pomocí statistických testů shody a podle přiléhavosti k empirickým bodům byla vybrána

nejvhodnější teoretická rozdělení, mezi něž patřilo rozdělení log-Pearsonovo III, generalizované extrémální a log-normální III. Každé rozdělení se ukázalo být vhodným jen pro určitá povodí.

Článek dále přináší informace k trendům průtoků za sledované období. Na rozdíl od článku 3 proběhly testy na větším souboru stanic (celkem 148) a byl použit jiný statistický test. Byl vybrán Mann-Kendallův test, který je v hydrologii jedním z nepoužívanějších testů trendu. V případě měsíčních průtoků byly potvrzeny předchozí výsledky, tedy rostoucí trendy v období leden až březen, nevýrazný duben a výrazně zmenšující se průtoky v květnu a červnu. Tyto trendy jsou v souladu s prací Brázdila et al. (2008), kteří pro stejné období (1961–2005) identifikovali trendy teploty vzduchu a srážek podporující zjištěné trendy odtoku (blíže viz v kapitole Výsledky a diskuze). V hodnotách průměrných ročních průtoků a 7-denních minimálních průtoků bylo identifikováno jen několik případů se signifikantním (a to převážně klesajícím) trendem. U průměrů se jedná o stanice na Odře a Bečvě, u minim se poklesy vyskytují na levostranných přítocích horního Labe a v povodí horní Moravy. Trendy M-denních průtoků Q_{330} , Q_{355} a Q_{364} vykazují podobný charakter jako trendy ročních 7-denních minim.

Článek 5 je komplexní studií malých průtoků na českých tocích. Finální soubor 144 stanic prošel pečlivým výběrem a připomínkami od poboček ČHMÚ a je tak nejlepším možným, téměř kompletním a pro studium malých vod vhodným souborem stanic s nepřerušným pozorováním v období 1961–2005. U každé stanice byl identifikován režim ročního minima a podle něj byly stanice rozděleny na horské a nížinné. Testovány byly trendy ročních, letních a zimních sedmidenních minim, roční počty dnů s průtoky pod Q_{330} (dále jen “ D_{330} ”) a Q_{355} (“ D_{355} ”) a nedostatkové objemy vymezené stejnými prahovými hodnotami. Testování proběhlo standardním a modifikovaným Mann-Kendallovým testem trendu.

Analýza sezonality ročních minim ukázala, že jejich hlavním obdobím výskytu je léto, z měsíců nejčastěji srpen. Druhý častý výskyt minim nastává v lednu. Letní minima způsobují situace s nedostatkem srážek, při kterých zároveň nastanou vysoké teploty podporující výpar. V zimě se průtoky zmenší retencí srážek ve formě sněhu a zámrzem vodních toků. Polárními grafy byla znázorněna nejen období výskytu, ale i velikost minim, ze kterých vyplynulo, že letní minima jsou zpravidla menší než zimní.

Co se trendů týče, u většiny charakteristik převládají nesignifikantní trendy. Statistická významnost byla identifikována u relativně malé skupiny stanic

v případě letních minim, kde dochází k jejich zmenšení, u zimních minim, která se zvětšují, a u délek trvání sucha a nedostatkových objemů, které se také zvětšují. Tyto stanice se překvapivě koncentrují v horním povodí řeky Moravy. Dále bylo zjištěno, že poměr rostoucích a klesajících trendů je podobný u horských i nížinných stanic.

Data letních a zimních minim byla zkoumána kvůli potenciálním posunům do dřívější nebo pozdější části roku. Také zde převažují nevýznamné posuny, ovšem u 10 % stanic dochází k signifikantní změně letního minima, z toho u 9 % nastává jejich výskyt dříve. Možným vysvětlením by mohly být teplejší zimy, které končí dřívější kulminací jarní povodně. Zimní minima nevykazují žádný posun.

Test trendu proběhl ve standardní a modifikované verzi, která nejprve odstraňuje z časové řady případnou autokorelaci. Podle očekávání modifikovaná verze testu identifikovala méně signifikantních případů než verze standardní. Například v případě počtu dnů s průtoky pod Q_{330} se snížil počet signifikantních případů o 55 %. Výjimečně se stalo, že se výsledky testů od sebe nelišily, což byl případ testování řad deficitních objemů vymezených prahem Q_{330} (dále jen " V_{330} ").

Také **článek 6** pojednává o deficitních objemech, ovšem zabývá se mimo jiné jejich vztahem k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí. Deficitní neboli nedostatkový objem byl vyčíslen jako součet rozdílů průtoků mezi prahovou hodnotou a skutečně se vyskytnuvším průtokem za dobu trvání malé vodnosti. Nedostatkové objemy v článku 6 byly vymezené M-denním průtokem Q_{330} a byly analyzovány z hlediska své velikosti a variability. Roční hodnoty objemů vyjádřené v milimetrech na plochu povodí se ve zkoumaných povodích pohybovaly do 8,1 mm, resp. do objemu $8100 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$. Z analýzy vyplynulo, že se vysoké hodnoty nedostatkových objemů vyskytují v povodích, která leží ve vyšších nadmořských výškách, mají vysoké úhrny srážek a relativně malou potenciální evapotranspiraci. Jsou to proto povodí s dostatkem vody, s vysokou odtokovou výškou.

Vztah k fyzicko-geografickým charakteristikám byl zkoumán na hodnotách nedostatkových objemů pod průtokem Q_{330} („ V_{330} “), na průměrných ročních sumách dnů s průtokem pod Q_{330} („ D_{330} “) a na koeficientech variace těchto proměnných („ CV_{V330} “ resp. „ CV_{D330} “). Velikost nedostatkového objemu kladně korelovala například s průměrným ročním úhrnem srážek a se specifickým M-denním průtokem Q_{330} (tj. průtokem Q_{330} děleným plochou povodí, dále jen $Q_{330\text{specif.}}$), kde korelační koeficient dosáhl hodnoty 0,96. Nejvíce negativně korelovaly hodnoty V_{330} s průměrnými ročními výškami potenciální evapotranspirace.

Jedním z cílů této části projektu bylo sestavení regresní rovnice pro výpočet nedostatkových objemů. Parametry rovnice byly ovlivněny vypočtenými korelačními koeficienty. Díky nejsilnější korelaci do rovnice vstupuje $Q_{330\text{specif.}}$ a koeficient variace průměrných denních průtoků. Výsledná rovnice má tvar:

$$V_{330} = 578,07 * (Q_{330\text{specif.}}) + 0,7 * (CV) - 0,97$$

Chceme-li tedy vypočítat nedostatkové objemy nějakého povodí k určité stanici, potřebujeme k tomu znát koeficient variace průměrných denních průtoků, plochu povodí a průtok Q_{330} . Hodnoty vypočtené regresní rovnicí korelovaly s reálnými hodnotami velmi těsně (korelační koeficient 0,97). Koeficient determinace byl roven 0,94 a lze tedy prohlásit, že rovnice vypočítá hodnotu velmi přesně.

Článek upozorňuje na fakt, že sice v absolutním měřítku vychází největší nedostatkové objemy na horských tocích, je ale nutné si uvědomit, že tato povodí mají dostatek srážek a relativně velký průtok Q_{330} . Pro správnější představu je proto vhodné si spočítat podíl nedostatkových objemů na odtokové výšce povodí. Tento podíl činí maximálně 1 %.

Koeficienty variace nedostatkových objemů se u sledovaných stanic pohybují od 0,75 do 2,30. Nejméně kolísají objemy na některých povodích na Vysočině, v jižních Čechách nebo v povodí Moravy. Nejproměnlivější jsou na horách a ve východních Čechách. Z rozložení hodnot korelačních koeficientů nevyplývá žádná výrazná vazba na některou fyzicko-geografickou charakteristiku povodí, nicméně se dá říct, že rozkolísanost nedostatkových objemů je větší v povodích s dostatkem vody a naopak negativní se ukázala vazba s průměrnými denními průtoky a evapotranspirací.

V závěru článku se diskutuje četnost výskytu M-denního průtoky Q_{330} . Sleduje se, v kolika letech sledovaného období klesl průtok na nebo pod tuto hodnotu a které roky byly z hlediska této hodnoty extrémní.

4 Výsledky a diskuze

4.1 Výběr nového normálového období

Jednou z pracovních činností Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) je analýza hydrologických charakteristik a stanovování návrhových veličin. Tyto veličiny jsou zpravidla vydávány za tzv. normálové období, tedy časový úsek několika desítek let charakterizující hydrologický režim daného toku, pramene apod. Prvním

oficiálním obdobím bylo třicetiletí 1931–1960 (Horský et al. 1970), které bylo později prodlouženo do roku 1980.

S přelomem tisíciletí logicky vyvstala otázka úpravy normálového období. Na základě hydrologických studií, které doporučily pro výpočet charakteristik nepoužívat období delší padesáti let s ohledem na rostoucí vliv nestacionarity (Kašpárek et al. 1999), bylo rozhodnuto neprodlužovat období začínající rokem 1931. V době vybírání nového období mělo již Slovensko vypočteno charakteristiky pro roky 1961–2000 (Šipikalová et al. 2003). Mít k dispozici stejné období pozorování a možnost srovnávat hydrologický režim s naším východním sousedem byl argument pro výběr tohoto časového úseku. Silným argumentem proti ovšem byla absence hydrologicky extrémních roků 2002 a 2003. Jasným zájmem bylo tyto roky do výpočtu charakteristik zahrnout. Kvůli velmi málo vodním rokům 1963 a 1964 a extrémně vodnému roku 1965 **bylo nakonec vybráno období 1961–2005**. Z dat naměřených v těchto 45 letech bylo vypočteno množství hydrologických charakteristik (N-letých vod, M-denních průtoků, měsíčních a ročních průměrných průtoků), na nichž pak probíhaly další analýzy a srovnání.

Z důvodu tvorby nové složitější, avšak přesnější metody výpočtu M-denních vod se proces přechodu na nové období zdržel do roku 2010, ve kterém bylo rozhodnuto, že se novým normálovým obdobím nakonec stane třicetiletí 1981–2010 (Kulasová 2010). Jedním z důvodů pro toto období je fakt, že nebude nutné řešit odovlivňování průtoků naměřených před rokem 1979. Od roku 1979 počítá odovlivněné průtoky Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka.

V procesu výběru nového období byla diskutována problematika stacionarity klimatu. Stacionarita náhodného procesu znamená, že se jeho statistické charakteristiky v čase nemění (Kingsbury 2005). Stacionární přírodní systém vykazuje variabilitu, která ovšem nikdy nepřekročí určitou horní a dolní mez. Již v devadesátých letech 20. století Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka v souvislosti s měnícím se klimatem vydal doporučení neprodlužovat normálové období nad 50 let kvůli možné nestacionaritě delší řady (Kašpárek et al. 1999). Také prof. Nacházel v redakční poznámce k článku o trendech průtoků v období 1961–2005 (Fiala 2008) píše, že trendy mohou být ovlivněny nestacionaritou časových řad. Definitivně se se stacionaritou vypořádali Milly et al. (2008), kteří zřetelně prohlásili, že stacionarita je mrtvá. Tvrdí, že již dlouhou dobu byla nabourávána antropogenním ovlivněním vodních toků a definitivní ránu jí zasadila klimatická změna. Přicházející změny ve

srážkových extrémech, průtocích, růst hladiny světového oceánu a tání ledovců dokládají neplatnost předpokladu stacionarity. Naopak Hunt (2004) při analýze průměrné globální teploty vzduchu v období 1949–2001 dospěl k závěru, že vykazuje známky stacionarity. Podle něj je to proto, že velké regionální anomálie neexistují samostatně bez zpětné vazby, která jejich působení kompenzuje. Uvádí příklad fenoménu ENSO, který vyvolává v jednom místě přebytek srážek, v jiném nedostatek. Autor této dizertační práce si je problému nestacionarity vědom, ale hlubší výzkum tohoto fenoménu nebyl náplní jeho práce.

4.2 Trendy průměrných průtoků

Trendy průměrných měsíčních a ročních průtoků uvedené v této dizertační práci jsou v souladu s vývojem klimatu a průtoků v Evropě. Tank et al. (2005) zpracovali globální studii, v které identifikovali trendy teploty vzduchu na 185 meteorologických stanicích po celé Evropě. Pro období 1976–1999 zjistili rostoucí trendy pro všechna roční období kromě podzimu, ve kterém dochází k mírnému ochlazení. K největšímu oteplování dochází v zimě, a to nejvíce na severu Evropy a nejméně ve Středomoří. Tyto výsledky potvrzuje práce Brázdila et al. (2008), kteří v období 1961–2005 zjistili na stanicích v České republice rostoucí trend teploty vzduchu od zimy do léta. Jen na podzim teplota stagnuje, nebo se mírně snižuje. V zimě se kromě průměrné zvyšuje také maximální a minimální teplota (Huth, Pokorná 2005). Shodné trendy teploty byly zjištěny i v okolních zemích. V Sasku teplota stoupá ve všech ročních obdobích kromě podzimu, kdy mírně klesá a to především v oblasti Krušných hor (Franke et al. 2004). Podobně se otepluje také v Polsku, kde se v zimě snižuje počet mrazových dní (Kozuchowski, Degirmendžić 2005). U průměrných měsíčních teplot došlo v období 1951–2000 k signifikantnímu nárůstu v březnu (o 3 °C) a květnu (o 1,5 °C). Jakožto jediné období s poklesem teploty (nejvýraznějším v jižní části země) byl i v Polsku zjištěn podzim (Degirmendžić et al. 2004). Na Slovensku byl v období 1961–2000 zaznamenán nárůst teploty především v zimě a na konci léta (Majerčáková et al. 2004).

Srážkové trendy, ač v některých případech statisticky nevýznamné, korespondují se změnami v odtoku podobně jako teploty. V ročních úhrnech nedochází ve střední Evropě prakticky k žádným změnám, lineární trendy naznačují zvětšování či zmenšování srážek v řádu několika málo milimetrů za 10 let (Brázdil et al. 2008). V jednotlivých ročních obdobích jsou změny markantnější. V Čechách se úhrny zmenšují na jaře (nejvíce v květnu) a zvětšují se na podzim a v zimě. Zimní zvyšování bylo zaznamenáno také na Slovensku a v Sasku, ale letní trendy jsou v těchto zemích

opačné (Majerčáková et al. 2004, Franke et al. 2004, Vojtek et al. 2003). Podobně jako v České republice bylo zmenšení jarních srážek zjištěno v Maďarsku v období 1901–1998 (Domonkos 2003), naopak v Polsku se jarní srážky v druhé polovině 20. stol. zvětšovaly a kompenzovaly tak zvyšující se teplotu vzduchu (Kozuchowski, Degirmendžić 2005).

Trendy klimatu se odrážejí rovněž ve změnách odtoku v Evropě. Komplexní celoevropskou studii publikovali Stahl et al. (2010). Odtok byl vyhodnocen z hlediska trendu a sezonality u 441 povodí z 15 evropských zemí pro čtyři různá časová období. Výsledky potvrzují závěry dřívějších projektů. Z hlediska průměrných ročních průtoků v období 1962–2004 lze rozdělit Evropu na část, kde dochází k jejich zmenšování, kam patří jih a část východu kontinentu, a na část, kde se průtoky zvětšují, což je Skandinávie, Británie a okolní oblasti. V chladné části roku (od října do března) dochází v téměř celé Evropě k nárůstu průměrných měsíčních průtoků. Výjimku tvoří povodí ve Španělsku, jižní Francii a několik míst ve střední Evropě. Klesající trendy dominují od dubna do září. Pouze v Norsku a Švédsku převládají rostoucí trendy také v letní části roku, což je možné přičíst nárůstu srážkových úhrnů.

Zvyšující se zimní teplota vzduchu zvětšuje podíl kapalných srážek na úkor pevných. Tento trend byl například zjištěn u srážek v Tatrách (Vojtek et al. 2003). Menší podíl srážek se tak ukládá ve formě sněhu a více vody může přímo odtékat. Navíc, jak bylo zmíněno výše, dochází k mírnému nárůstu zimních srážkových úhrnů. Důsledkem by tedy mělo být zvětšení zimního odtoku, které by se mělo projevit nejvíce tam, kde až doposud tvořil sních významnou část zimních srážek; v České republice tedy na horách a v podhůří. A přesně takové chování průměrných měsíčních průtoků sledujeme na obr. 5 v článku 4 (Kulasová et al. 2008). **Lednové, únorové a březnové průtoky se signifikantně zvětšují na horních tocích na Šumavě, v Krkonoších, Orlických horách a Jeseníkách.** Na dolních úsecích řek se zvětšení již neprojevuje.

Po zimě přichází jaro, v kterém se teplota vzduchu zvyšuje, ovšem srážky se spíše zmenšují, a to hlavně v květnu (Brázdil et al. 2008). V řekách tím pádem **ubývá vody, a to především v květnu a v červnu. Úbytek vody je pravděpodobně také způsoben teplejšími zimami, v kterých se méně srážek ukládá ve formě sněhu.** Na jaře tak tající sních přispívá méně do celkové vodnosti.

Výše uvedené trendy korespondují s výsledky jiných hydrologických studií. Shodné výsledky přinesla práce Střeštíka (2002), který v průtocích na Vltavě v Praze identifikoval pokles jarních a růst zimních průtoků ve 2. polovině 20. století. Také

Kliment a Matoušková (2008) ve své studii prokázali nárůst zimního a navíc zmenšení letního odtoku vody z povodí Otavy. Signifikantní růst zimního odtoku vykazují řeky ústící do jižní části Baltského moře, tedy řeky v Polsku a Pobaltí (Dippner et al. 2007).

Ve zbylých ročních obdobích, tedy v létě a na podzim, se vyskytuje signifikantních trendů velmi málo (Kulasová et al. 2008). V červenci a srpnu jsou všechny statisticky významné trendy klesající a vyskytují se převážně ve východní části republiky, ale je jich daleko méně než v květnu a červnu. Od září do prosince na českých tocích dominují nevýrazné trendy. Také Střešík (2002) považuje letní a podzimní trendy průtoků na Vltavě v Praze za slabé.

V řadách průměrných ročních průtoků převažují stanice bez trendu, případně dochází k mírnému poklesu. Ve výběru 65 vodoměrných stanic byla v celé České republice s využitím testu trendu v programu CTPA nalezena jediná se statisticky významným trendem (Fiala 2008). V navazující studii bylo modifikovaným Mann-Kendallovým testem trendu **ze 148 stanic zjištěno 12 se signifikantním trendem a to převážně klesajícím u stanic v povodí Odry a Bečvy** (Kulasová et al. 2008). Kašpárek (1998) zkoumal průtoky na Labi v Děčíně v období 1851–1996. Z celé řady vychází trend mírně vzestupný. Pokud ovšem vzal řadu až od 40. let 20. století, zjistil stagnaci případně mírný pokles odtoku. Také na Slovensku roční odtoky klesají, nejvíce v jižních částech země a v zimním půlroce (Majerčáková et al. 2004). Pekárová et al. (2002) rovněž identifikovali zmenšení průtoků na slovenských tocích, ale zároveň upozorňuje na zvětšování v posledních deseti letech a možnou 13–15letou periodicitu ve srážkových úhrnech a průtocích na Slovensku.

4.3 Trendy malých vod

Trendy malých průtoků a nedostatkových objemů jsou podrobně zpracovány v článku 5. Jako charakteristika malých vod byl vybrán roční minimální průtok vypočtený ze sedmidenních klouzavých průměrných denních průtoků. Stanovení minima z klouzavých průměrů sedmi nebo více hodnot je vhodnější, neboť se tím omezí možné krátkodobé chyby způsobené chybou limnigrafu nebo antropogenním ovlivněním. Například Hannaford et al. (2006) použili ve své studii britských řek roční minima odvozená ze sedmi a třicetidenních klouzavých průměrů.

Na hladině významnosti $p=0,1$ nebyl zjištěn statisticky významný trend sedmidenních ročních minim u 90 % stanic (Kulasová et al. 2008). Tam, kde se trend vyskytnul, převažoval pokles. Vyhodnocení ročních minim ovšem není zcela vypovídající, neboť ta mohou v České republice nastat v létě vlivem sucha nebo v zimě

vlivem zámru. V dalším postupu zpracování dizertační práce proto byla minima rozdělena na zimní a letní (Fiala et al. 2010) a tato testována na trendy zvlášť. Navíc byly testované stanice rozděleny (přibližně podle nadmořské výšky povodí) na dvě skupiny, horské a nížinné, a bylo zkoumáno, zda se trendy chovají u obou skupin shodně. **Jen o něco více než 10 % stanic (horských i nížinných) vykázalo nenulový trend letních minim, u většiny z nich byl klesající. Naopak zimní minima se převážně zvětšovala, ale jejich podíl byl také relativně malý.** Chování malých průtoků tak do značné míry kopíruje vývoj průměrných průtoků: v zimě se zvětšují a v létě zmenšují. Je pravděpodobné, že jedny z faktorů, které na tuto změnu mají vliv, jsou měnící se srážkové úhrny a teplota vzduchu. Birsan et al. (2005) zjistili zvětšování zimních a zmenšování letních minim na 42 povodích ve Švýcarsku. Vzhledem k téměř konstatním zimním srážkovým úhrnům a výraznému zvýšení počtu dnů s minimální teplotou nad 0 °C byla zvyšující se teplota označena jako hlavní příčina zvětšujících se průtoků. Stejně tendence, tedy zvětšování zimních minim a zmenšování letních, byly identifikovány v řadách ročních minim na Dunaji (Pekárová et al. 2008).

Kromě minimálních průtoků byly testovány roční nedostatkové objemy a délky trvání průtoků pod dvěma mezemi, kterými byly M-denní průtoky Q_{330} a Q_{355} . Výsledky byly podobné výsledkům minimálních průtoků: jen 10–20 % stanic zaznamenalo signifikantní trend. Pokud byl trend statisticky významný, tak byl převážně rostoucí: zvyšovaly se počty dnů sucha a zároveň se zvětšovaly nedostatkové objemy. Stanice s těmito tendencemi se koncentrují v horním povodí řeky Moravy a na levostranných přítocích horního Labe.

Testujeme-li časové řady na hladině významnosti $p=0,1$, můžeme ze statistického hlediska očekávat, že u 10 % z nich nalezneme signifikantní trend. Jak bylo uvedeno výše, při testování minimálních průtoků a nedostatkových objemů bylo zpravidla identifikováno 10–20 % statisticky významných případů. Z tohoto pohledu tak lze konstatovat, že u testovaných charakteristik hydrologického sucha nedošlo v období 1961–2005 k významným změnám. Ovšem ve skupině stanic se signifikantními trendy nejsou rovnoměrně zastoupeny vzrůsty a poklesy. Převládají tendence ke zvětšování nedostatkových objemů, zmenšování letních a zvětšování zimních minim.

Jak tyto závěry korelují s výsledky jiných studií? Celoevropskou studii hydrologického sucha vypracovali Hisdal et al. (2001). Vymezili období sucha p-procentním průtokem $Q_{70\%}$ (tj. průtokem překročeným v 70 % případů) a vypočítali

roční nedostatkové objemy a délky trvání sucha. Z prostorového rozložení kladných a záporných trendů lze identifikovat místa, která v období 1962–1990 vykazovala tendenci k většímu či menšímu výskytu hydrologického sucha. Jedním z těchto míst byla i Česká republika, kde autoři zjistili zmenšování nedostatkových objemů v povodí Labe a naopak zvětšování v povodí Moravy. Nepříznivý trend našli také na Slovensku, v jižní Anglii a ve Španělsku. Zmenšující se nedostatkové objemy připadají na jižní Německo, Rakousko, Bělorusko a Ukrajinu. Stahl et al. (2010) dospěli při analýze sedmidenních ročních minim k závěru, že se zvětšují v oblastech, kde převažují zimní minima (tj. v Alpách a ve Skandinávii) a naopak že se zmenšují tam, kde se vyskytují v létě. Na Slovensku odpovídají výsledky Hisdal et al. (2001) dřívějším závěrům Majerčákové et al. (1997). Ti za místa s největším poklesem průtoků označili jižní Slovensko, tedy povodí řek Slaná, Ipel' či Bodva.

Vývoj hydrologického sucha je do značné míry determinován vývojem sucha meteorologického, především změnou teploty vzduchu a srážek. Trendy meteorologického sucha v Evropě zpracovali s využitím indexů SPI a PDSI Lloyd-Hughes et al. (2002). V období 1901–1999 zjistili zmenšování sucha ve Skandinávii a v zemích Beneluxu a zvětšování ve východní Evropě a západním Rusku. Výraznější trendy byly zjištěny na jaře a v zimě, menší v létě a na podzim. Stejně indexy aplikovali ve studii zabývající se povodím Labe Krysanova et al. (2008). Pro období 1951–2003 prokázali tendenci k častějšímu výskytu meteorologického sucha v německé části Labe. V části povodí patřící České republice vyšly trendy převážně nesignifikantní. Na meteorologických stanicích na jižní Moravě byl vývoj sucha v období 1961–2003 testován Končerkovým indexem zavlažení, který kromě teploty vzduchu a srážek bere v úvahu také rychlost větru (Dufková et al. 2005). Klesající lineární trend hodnot indexu (bez uvedení statistické významnosti) znamená snížení relativního zavlažení daného území. Autoři nicméně upozorňují, že pro období 1991–2000 vychází trendy opačné. Blinka (2009) ve své dizertační práci zkoumal vývoj meteorologického sucha na osmi stanicích v ČR několika indexy sucha. Pět ze šesti použitých indexů vykazalo statisticky významný nárůst sucha v období 1875–2002.

Při analýze trendů malých i průměrných průtoků můžeme zjištěné tendence přiřadit k trendům ve vývoji klimatu zpravidla pouze kvalitativně. **Lze prohlásit, že se průtoky v létě zmenšují, protože se zvyšuje teplota vzduchu podmiňující zvýšený výpar. Je třeba mít ale na paměti také další faktory, které odtok vody z povodí ovlivňují. Jedním z hlavních vlivů je člověk a jeho činnost v povodí.** V této práci byl

při výběru dat kladen důraz na to, aby byla antropogenní činností co nejméně ovlivněna ve smyslu vodohospodářském (absence přehrad a výrazných odběrů a vypouštění). Člověk ovšem odtok ovlivňuje rovněž změnou krajinného pokryvu. Vlivem změny land cover na odtok vody z krajiny se zabývá řada hydrologů, pedologů a krajinných ekologů. Posouzení tohoto vlivu však nebylo náplní dizertační práce. Proto za všechny uvedme jen několik příkladů: Střeštík (2002) prokázal zvýšení odtokového koeficientu v povodí Vltavy v posledních dvou stoletích a přisuzuje ho lidské činnosti, která napomohla zvětšení přímého odtoku. Kliment a Matoušková (2008) vysvětlují zvýšený odtok v povodí Otavy na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let 20. století mimo jiné také zvětšeným rozsahem meliorací a intenzivním zemědělstvím. Hlavčová et al. (2006) modelovali změnu odtokových poměrů v povodí Ipeľu při změnách krajinného pokryvu. Změnou současného stavu kulturní krajiny na původní přírodní prostředí (téměř celé povodí by bylo zalesněno) by došlo k poklesu celkového odtoku o 23 %. Povrchový odtok by klesl dokonce o 62 %. Naopak pokud by místo lesa byly vysazeny travní porosty, zvýšil by se odtok o 10 %. Jeníček (2007) modeloval vliv změny land cover na zpoždění a velikost povodňové vlny na Chomutovce. Při stoprocentním zalesnění území by v profilu Tišina kulminační průtok desetileté povodně poklesl o 17 % a vlna by přišla o 15 minut později než za současného stavu.

4.4 Období výskytu malých vod v roce

Období, ve kterém se na českých tocích objevují nejmenší průtoky, lze dobře identifikovat z grafu na obr. 5 v článku 5 (Fiala et al. 2010), který znázorňuje relativní frekvenci výskytu ročního minima pro každý den v roce. **Častěji se roční minima vyskytují v létě**, druhotné maximum výskytů přichází v zimě. Ve studovaném období 1961–2005 a na vybraných 144 stanicích připadá průměrné datum letního minima na 28. srpen. **Toky v povodí Labe mají nejméně vody v červenci a srpnu. V povodí Odry výskyt minim nastává trochu později, nejčastěji na konci srpna nebo začátku září. Zimní minimum, analyzované pouze na horských stanicích, nastává v průměru 25. ledna.** Nejdříve přichází na Otavě a to v první polovině ledna. Na přelomu ledna a února se vyskytují zimní sucha na tocích odvodňujících Hrubý Jeseník. Jako poslední nastávají minima v polovině února na horských tocích Jizerských hor a Krkonoš.

Nejvýznamnější publikací mapující mimo jiné malé průtoky na českých tocích byly Hydrologické poměry ČSSR, které v šedesátých letech minulého století vyčerpávajícím způsobem popsali hydrologii České a Slovenské republiky (Horský et al.

ed. 1970). V rámci vyhodnocení sezonality malých průtoků byl analyzován výskyt M-denních průtoků Q_{355} a Q_{364} u 68 stanic. Data končila rokem 1965 a byly použity co nejdelší řady pozorování dlouhé převážně 30–50 let. Zjištěné měsíce s největším výskytem malých průtoků korelují se sezonalitou minim popsanou výše. V povodí Labe připadla většina minim na červenec a srpen, ovšem v povodí Moravy častěji až na září. Čím více se jednalo o povodí horské, tím větší bylo zastoupení zimních měsíců.

Bohdálková a Vontorová (2010) se zabývaly sezonalitou sucha na Ostravici. Zpracovaly pro to měsíční sumy dnů s průtokem pod Q_{355} . Nejvíce se malé průtoky vyskytly v období od srpna do října. Výsledky tak potvrzují výše zmíněné závěry. Údaje ze stanice Šance dokládají vliv údolní nádrže na nalepšování průtoků. Na této stanici, která je hned pod nádrží, jsou minima rovnoměrně rozložena. Byla naměřena v každém měsíci v roce a podíl ročních období na výskytu minim se pohybuje od 20 do 34 %. Na rozdíl od toho v neovlivněné stanici Staré Hamry připadá na podzim 56 % všech minim a mezi prosincem a květnem se prakticky nevyskytují.

Sezonalitou malých průtoků na Slovensku se zabývaly Števková et al. (2010). Pro více než 200 povodí určili relativní měsíční počet dnů s průtoky pod Q_{355} . Na základě shlukové analýzy pak vymezili skupiny stanic s podobným režimem minim. Jako nejvhodnější byla vybrána metoda centroidů, pomocí které byly vyčleněny tři skupiny povodí. První zahrnuje povodí Vysokých a Nízkých Tater s převládajícím výskytem minim v zimě. Druhá skupina obsahuje povodí Fatry, Oravy a dalších středně vysokých hor, kde se kombinují minima na podzim a v zimě. Nížinná povodí tvoří třetí skupinu, ve které minima přichází v létě a na podzim. Podobně vertikálně členité území, konkrétně jihozápadní Německo, analyzovali Schreiber a Demuth (1997). Jako ukazatel sucha použili desetidenní roční minimální průtoky a zjišťovali jejich procentuální zastoupení v jednotlivých měsících v období 1950–1993. V povodích s malou nadmořskou výškou se minima vyskytla nejčastěji v září nebo říjnu. V alpské oblasti se letní minima prakticky nevyskytla a zcela dominovala zimní, nejčastěji lednová a únorová.

Podobný režim jako nížinné toky střední Evropy mají minima na litevských řekách. Nejčastěji přichází v období od května do září. Zimní minima jsou 1,2–2,8krát větší než letní, a proto se ročními minimy stávají zpravidla ta letní (Kriauciuniene et al. 2007).

Všechny výše uvedené regionální prvky sezonality malých vod zapadají do celoevropské studie Stahl et al. (2010). Podle té nastává v západní a střední Evropě

minimum v pozdním létě (mezi červencem a zářím). V Alpách a severní Evropě přichází díky zámrazu a ukládání sněhu minimum v lednu a únoru, v centrální a severní Skandinávii dokonce až v březnu. Studie také identifikovala posun data výskytu minima na dřívější datum a to v Německu, Francii, Švýcarsku, Rakousku a na Slovensku. V Čechách byl posun data zjištěn u 10 % stanic, z toho se v drtivé většině jednalo o posun k dřívějšímu datu minima (Fiala et al. 2010). Predikované scénáře klimatické změny signalizují rovněž posun počátku poklesové větve hydrogramu, tedy jarní kulminace. Ta by se měla především kvůli rostoucí teplotě vzduchu přesunovat z jara na konec zimy (Novický et al. 2008).

4.5 Výběr období ve vztahu k výsledkům

V diskuzi o trendech je velmi důležité uvádět, za jaké časové období byly vyšetřovány. **Z řady dlouhé několik desítek let nelze dojít k závěru, že její trend je platný také pro období před a po něm.** Pokud se v poslední době zvyšuje teplota vzduchu, neznamená to, že ve vzdálenější minulosti bylo vždy chladněji a v budoucnosti bude stále tepleji. Globální průměrná teplota vzduchu se od začátku 20. století zvyšovala do čtyřicátých let, pak ovšem nastal pokles, resp. stagnace, a k opětovnému vzrůstu dochází až od osmdesátých let (IPCC 2007). IPCC udává „velmi vysokou spolehlivost“ (pravděpodobnost nad 90 %), že se na oteplování podílí člověk. Řada vědců si ovšem myslí, že příspěvek lidské činnosti je zanedbatelný a že se jedná o přirozené kolísání klimatu způsobené terestrickými případně extraterestrickými vlivy.

Například v práci zabývající se vývojem malých průtoků v Kanadě byla srovnávána 30-, 40- a 50letá období končící vždy rokem 2004. Při porovnávání trendů zimních minim bylo zjištěno, že se pro obě kratší období vyskytují stanice s rostoucím trendem, zatímco žádná stanice nevykazuje tento trend pro 50leté období (Khaliq et al. 2008).

Kašpárek (1998) našel mírně vzestupný lineární trend v průtocích na Labi v Děčíně v období 1851–1996. Z řady klouzavých průměrů ovšem můžeme zřetelně identifikovat výrazný vzestup od šedesátých let 19. stol. do maxima po roce 1940, po kterém následovala stagnace případně mírný pokles odtoku.

Analýza časových řad ročních nedostatkových objemů na českých tocích prokázala pro období 1947–2006 výrazný podíl stanic s klesajícími trendy (44 % všech stanic vykazovalo klesající trend na hladině významnosti 0,05). Konec čtyřicátých a začátek padesátých let 20. století byly v České republice ve znamení malých průtoků

a velkých nedostatkových objemů. Pokud se podíváme na trendy v období začínajícím až v roce 1961, zjistíme, že u 80 % stanic nedochází k žádnému signifikantnímu posunu. Statisticky významných poklesů je ve srovnání s delším obdobím pouhá čtvrtina a naopak přibývá stanic s rostoucími nedostatkovými objemy (Novický et al. 2010).

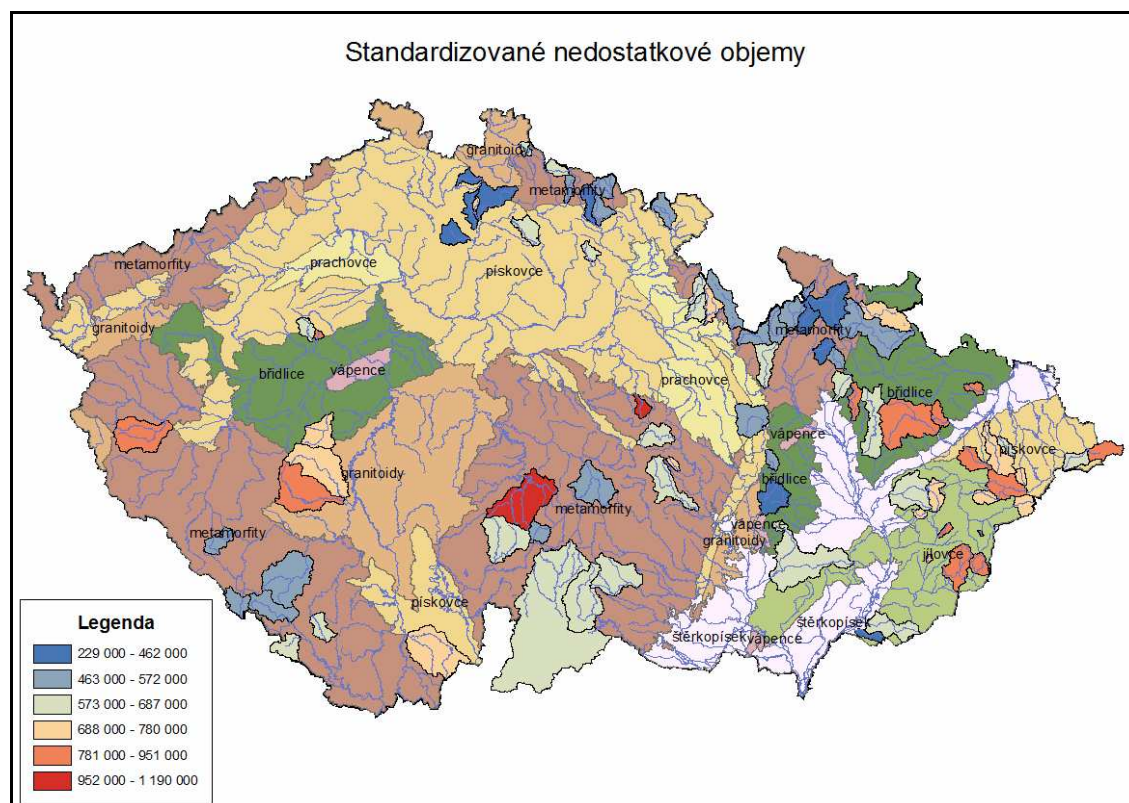
4.6 Vztah minim k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí

Při zkoumání vztahů mezi hodnotami charakteristik vyjadřujících hydrologické sucho a fyzicko-geografickými charakteristikami povodí bylo zjištěno, že velikost nedostatkového objemu vody přímo závisí na velikosti srážek a odtoku vody. Čím více srážek v povodí dopadá a čím více vody odtéká, tím větší jsou průměrné nedostatkové objemy. Je to logické, protože čím více je vody v povodí, tím větší je prahová hodnota (v tomto případě Q_{330}) a tím více může průtok v období sucha práh podkročit. Nelze z toho pochopitelně udělat závěr, že mají horská povodí kvůli velkým nedostatkovým objemům největší problémy s vodou. Nemají, vody je tam zpravidla stále dostatek. Také Podlaha (2003) při hledání vztahů mezi charakteristikou hydrologického sucha a ostatními vlastnostmi povodí dospěl k závěru, že rozhodující pro velikost minimálního odtoku je výška srážek. Ostatní faktory, jako např. podíl lesa na ploše povodí, jsou zanedbatelné a významně nepřispívají do objasnění korelačních vztahů.

V další fázi výzkumu byly proto nedostatkové objemy standardizovány – byly vyděleny velikostí své prahové hodnoty. Nové koeficienty korelace mezi standardizovanými objemy a fyzicko-geografickými charakteristikami byly daleko menší, silné závislosti nebyly nalezeny. **Velikosti nedostatkových objemů kladně korelovaly s množstvím jílu v půdě, nepropustností půdy a hodnotou CN povodí. Naopak se hodnoty objemů zmenšovaly, pokud rostla průměrná nadmořská výška povodí a podíl jehličnatého lesa** (Novický et al. 2010).

Při vynesení standardizovaných hodnot do mapy (obr. 1) vidíme, že se největší hodnoty nenalézají na horských povodích, ale spíše v nížinách a středních polohách (např. v západních Čechách, na Českomoravské vrchovině a v Nízkém Jeseníku). Závislost na typu krajinného pokryvu nebo nadmořské výšce skutečně nevidíme. Významnost nedostatkových objemů v povodí totiž spíše závisí na geologickém složení území, které pak utváří podmínky pro charakter podzemních vod. Ty jsou pro významnost nedostatkových objemů klíčové. Naneštěstí se podzemní vody obtížně kvantifikují, a proto nelze jejich parametry využít pro zkoumání korelačních závislostí.

Obr. 1: Standardizované hodnoty průměrných ročních nedostatkových objemů v m³ v období 1961–2005 (Fiala, nepublikováno)



Jediným testem, který bylo možné v tomto směru provést, byla analýza variance nedostatkových objemů ve vztahu k zjednodušené klasifikaci litologie podloží. Bylo testováno, zda typ podloží ovlivňuje hodnoty nedostatkových objemů. Povodí byla podle typu podloží rozdělena do šesti skupin: povodí na pískovcích, metamorfitech, prachovcích, granitoidech, břidlicích a jílovcích. Analýza variance (ANOVA), konkrétně Fisherův LSD test, počítá pravděpodobnost, s jakou se průměr a směrodatná odchylka skupiny liší od statistických charakteristik skupin ostatních. Test prokázal, že **povodí na jílovcích vykazují signifikantně (na hladině významnosti 0,05) vyšší hodnoty nedostatkových objemů než povodí s jinou litologií.** Žádná jiná skupina na zvolené hladině statisticky významnou odchylku neprokázala. Jílovce a slánovce jižní části Beskyd a Vsetínských vrchů jsou známé svojí nepropustností, rychlým odtokem podzemních vod a rozkolísaností průtoků řek, které zde tečou. V období sucha v této oblasti průtoky rychleji zaklesávají a nedostatkové objemy se rychle zvětšují. Naopak přítoky Jizery protékají místy s největšími zásobami podzemních vod v republice, které jsou schopné povrchový odtok dotovat v průběhu sucha relativně dlouho. Z obrázku 1 je vidět, že to jsou místa s nejmenšími nedostatkovými objemy. Prokázala se tak

nezbytnost standardizace dat pro korektní vyhodnocení významnosti nedostatkových objemů mezi povodími v České republice.

4.7 Budoucí vývoj vodnosti

Trendy průměrných a malých průtoků analyzovaných v této práci do značné míry korespondují s výsledky studií zaměřených na budoucí vývoj vodnosti. Při modelování budoucnosti se zpravidla do hydrologického modelu implementují výstupy z globálních nebo regionálních klimatických modelů, a to především vývoj teploty vzduchu a srážek. Kvůli řadě emisních scénářů a odlišným nastavením modelů je predikovaný vývoj značně neurčitý, přičemž dva různé modely mohou udávat zcela opačné trendy ve vývoji klimatických charakteristik. Příkladem jsou modely CGCM 3.1 a Aladin Climate, které pro území Slovenska v 21. století předpovídají nárůst, resp. pokles srážek (Macurová et al. 2010).

Z nejistoty v předpovědích vývoje podnebí vyplývá obtížnost stanovení budoucího vývoje vodnosti. Většina modelů indikuje pokračování v nastoleném trendu, kdy by se průtoky na jihu Evropy měly zmenšovat, a to především v létě, a naopak na severu zvětšovat. Přispěje k tomu zvyšování podílu anticyklonálních situací ve Středomoří a posun drah Atlantických cyklón více k severu. To s sebou přinese pokles srážek a vzestup teploty vzduchu v létě (Giorgi, Lionello 2008). Výsledkem bude pokles průtoků a častější výskyt sucha na jihu kontinentu a naopak stagnace nebo méně časté sucho na severu a západě (Blenkinsop, Fowler 2007)

Pro oblast střední Evropy se většina modelů shoduje na tom, že **v první polovině 21. století nedojde ve vývoji vodnosti k výraznější změně. V dalších letech už by se ovšem pokračující nárůst teploty vzduchu (a relativně stabilní vývoj ročních srážkových úhrnů) měl projevit poklesem odtoku.** Zmenšit by se měly jak průměrné, tak malé a velké průtoky. V České republice bylo v grantovém projektu MŽP „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ použito celkem osm klimatických modelů. Modelem AquaLog pak byly nasimulovány průměrné denní průtoky pro tři časové horizonty: 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099. Výsledky ukazují na postupné zmenšování průtoků Q_a a Q_{355} . V nejbližším období bude pokles zanedbatelný, ovšem na konci 21. století by průměrný průtok mohl poklesnout o cca 20 %, Q_{355} až o 25 % (Boháč et al. 2010). Studie VÚV T.G.M. uvádí, že by průtok v povodí Blšanky mohl na konci 21. století poklesnout o 19–55 % (Němec, Kopp, ed. 2009). Na rozdíl od toho nelze u vývoje povodňových průtoků vysledovat

výraznější tendenci. Spíše se ve vzdálenější budoucnosti očekává jejich mírný pokles (Daňhelka et al. 2010).

Dynamičtější změny než u ročních průměrů lze očekávat u jednotlivých měsíců. Podle klimatických scénářů by mělo docházet k nárůstu teploty vzduchu v celém roce, ovšem srážky by se měly zvyšovat v zimě a snižovat v létě. Důsledkem bude nárůst průtoků v zimě, neboť spadne více srážek a zároveň méně se jich zadrží ve formě sněhu. Naopak ke zmenšení průtoků bude docházet na jaře a v létě vlivem posunu jarního tání, zvýšené teploty, výparu a poklesu srážek. V létě by tak mohl průtok v závěru 21. st. klesnout až o 50 % (Fridrichová et al. 2010). Velmi podobně by se mohly vyvíjet průtoky na Slovensku. Největší relativní nárůst (až o 27 %) by měl přijít v lednu, největší pokles (o 53 %) v srpnu a září (Macurová et al. 2010). Na severu Slovenska by měl být zimní nárůst výraznější než na jihu, kde by mělo být toto období časově kratší (Szolgay 2007).

Ruku v ruce se zmenšováním průtoků jde pokles zásob podzemních vod a vydatnosti pramenů. Vizina et al. (2009) modelovali vývoj zásob vody v povodí Metuje. V porovnání se současným stavem udává model Bilan možný pokles hladin podzemních vod v centrální části vnítrusudetské pánve až o 10 metrů. Zmenšovat se má v letním období i zásoba vody v půdě.

Uvedené předpovědi očekávající nárůst výskytu hydrologického sucha v České republice jsou velmi závažné. Pokud se předpovědi vyplní, je pravděpodobné, že průtoky nebudou dosahovat hodnot minimálních zůstatkových průtoků stanovených vodoprávními úřady. Dojde také k poklesu hladin podzemních vod a zmenšení základního odtoku. Vodní zdroje ve většině povodí by tak nebyly schopny spolehlivého zásobování vodou. Ani změna manipulačních řádů vodních děl by zřejmě problém sucha nevyřešila. Tento aspekt změny klimatu proto legitimizuje ochranu lokalit, které jsou vytipované pro potenciální výstavbu vodních nádrží v případě nepříznivého vývoje klimatu.

5 Literatura

BIRSAN, M., V., MOLNAR, P., BURLANDO, P., PFAUNDLER, M. (2005): Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 314, č. 1–4, str. 312–329.

BLENKISOP, S., FOWLER, H., J. (2007): Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *International Journal of Climatology*, 27, str. 1595–1610.

BLINKA, P. (2009): Klimatologické hodnocení sucha na území Čech a Moravy v letech 1875–2002. Disertační práce, KFGG PřF UK, Praha, 139 s.

BOHÁČ, M., KUKLA, P., KULASOVÁ, B. (2010): Dopady změny klimatu na minimální průtoky. Sborník z konference Hydrologické dny 2010, Hradec Králové, ČHMÚ, str. 77–82.

BOHDÁLKOVÁ, J., VONTOROVÁ, J. (2010): Minimální průtoky řeky Ostravice. Sborník z konference Hydrologické dny 2010, Hradec Králové, ČHMÚ, str. 625–630.

BRÁZDIL, R., CHROMÁ, K., DOBROVOLNÝ, P., TOLASZ, R. (2008): Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961–2005. *International Journal of Climatology*, 29 (2), str. 223–242.

BRÁZDIL, R., TRNKA, M., DOBROVOLNÝ, P., CHROMÁ, K., HLAVINKA, P., ŽALUD, Z. (2009): Variability of droughts in the Czech Republic, 1881–2006. *Theoretical and Applied Climatology*, 97, str. 297–315.

BRUNETTI, M., BUFFONI, L., MANGIANTI, F., MAUGERI, M., NANNI, T. (2004): Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global and Planetary Change* 40, str. 141–149.

DANKERS, R. et al. (2007): Future changes in flood hazard in Europe. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen). Finnish Environment Institute, Helsinki, str. 115–120

DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., VLASÁK, T. (2010): Vliv klimatické změny na povodňový režim. Sborník z konference Hydrologické dny 2010, Hradec Králové, ČHMÚ, str. 71–75.

DEGIRMENDŽIĆ, J. et al. (2004): Changes of Air Temperature and Precipitation in Poland in the Period 1951–2000 and Their Relationship to Atmospheric Circulation. *International Journal of Climatology* 24, str. 291–310.

DIPPNER, J. et al. (2007): Climate Change in Baltic Sea Area. *Baltic Sea Environment Proceedings No. 111*, Helsinki Commission, 49 s.

DUFKOVÁ, J., TOMAN, F. (2005): Vliv vlhkosti půdy na potenciální erodovatelnost větrem. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed.): Bioklimatologie současnosti a budoucnosti, Křtiny, 12.–14. 9. 2005, ISBN 80-86 690-31-08, 11 s.

FIALA, T. (2008): Statistical Characteristics and Trends of Mean Discharges of Period 1961–2005. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 56, č. 2, SAV, Bratislava, str. 133–140.

FIALA, T., OUARDA, T., HLADNÝ, J. (2010): Evolution of low flows in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 393, str. 206–218.

FRANKE, J., GOLDBERG, V., EICHELMANN, U., FREYDANK, E., BERNHOFER, C. (2004): Statistical analysis of regional climate trends in Saxony, Germany. *Climate Research*, 27, str. 145–150.

FRIDRICHOVÁ, R., KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ, O., VYSKOČ, P. (2010): Studie zaměřené na dopady klimatických změn na vodní režim a vodní zdroje. Sborník z konference Hydrologické dny 2010, Hradec Králové, ČHMÚ, str. 25–31.

GIORGI, F., LIONELLO, P. (2008): Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63, str. 90–104.

HANNAFORD, J., MARSH, T. (2006): An assessment of trends in UK runoff and low flows using a network of undistributed catchments. *International Journal of Climatology*, 26, č. 9, str. 1237–1253.

HISDAL, H., STAHL, K., TALLAKSEN, L., M., DEMUTH, S. (2001): Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, 21, č. 3, str. 317–333.

HISDAL, H. et al. (2007): Climate change signals in streamflow data in the Nordic and Baltic region. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen). Finnish Environment Institute, Helsinki, str. 182–187.

HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S., PAPÁNKOVÁ, Z. (2006): Analýza zmeny odtoku spôsobenej zmenou využívania územia na povodí Ipl'a. Sborník z konference Bioklimatológia a voda v krajine, 11.–14.9.2006, Strečno, 12 s.

HORSKÝ, L., ČERMÁK, M., DAŇKOVÁ, H., HLADNÝ, J., HLUBOCKÝ, B., KŘÍŽ, V., KULHÁNEK, V., MALÝ, O., RICHTER, V., SOCHOREC, R., SOMMER, M., ZATKALÍK, G. ed. (1970): *Hydrologické poměry ČSSR. Díl III. Hydrometeorologický ústav, Praha*, 305 s.

HUNT, B., G. (2004): The stationarity of global mean climate. *International Journal of Climatology*, 24, č. 7, str. 795–806.

HUTH, R., POKORNÁ, L. (2005): Simultaneous analysis of climatic trends in multiple variables: An example of application of multivariate statistical methods. *International Journal of Climatology*, 25, č. 4, str. 469–484.

IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Summary for Policymakers*. WMO, Geneva, 18 s.

JENÍČEK, M. (2007): Effects of land cover on runoff process using SCS CN method in the upper Chomutovka catchment. In: *Proceedings of the 1st Scientific Conference on Integrated catchment management for hazard mitigation*, 24.–26.9.2007, Remote Sensing Department, University of Trier, Trier, str. 42–46.

KAŠPÁREK, L. (1998): Dlouhodobé kolísání odtoku v povodí Labe a jeho vztah k výskytu hydrologického sucha. Číslo úkolu 45/210, VÚV T.G.M., Praha, 10 s.

KAŠPÁREK, L. et al. (1999): *Metody výpočtu hydrologických dat v měnících se podmínkách. Metody zpracování dat v nestacionárních podmínkách*. Číslo úkolu 1043/210, VÚV T.G.M., Praha, 25 s.

KHALIQ, M., N., OUARDA, T., B., M., J., GACHON, P., SUSCHAMA, L. (2008): Temporal evolution of low-flow regimes in Canadian rivers. *Water Resources Research*, 44, W08436, doi:10.1029/2007WR006132, 19 s.

KINGSBURY, N. (2005): Stationarity. *Connexions website*, Rice University, Houston, <http://cnx.org/content/m11102/2.3> (stav k 5. 9. 2010)

KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2008): Long-term Trends of Rainfall and Runoff Regime in Upper Otava River Basin. *Soil & Water Research*, 3 (3), str. 155–167.

KOŽUCHOWSKI, K., DEGIRMENDŽIĆ, J. (2005): Contemporary changes of climate in Poland: Trends and variation in thermal and solar conditions related to plant vegetation. *Polish Journal of Ecology*, 53, č. 3, str. 283–297.

KRIAUCIUNIENE, J., KOVALENKOVIENE, M., MEILUTYTE-BARAUSKIENE, D. (2007): Changes of the dry period runoff in Lithuania. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen). Finnish Environment Institute, Helsinki, str. 260–265.

KRYSANOVA, V., VETTER, T., HATTERMAN, F. (2008): Detection of change in drought frequency in the Elbe basin: comparison of three methods. *Hydrological Sciences Journal* 53(3), str. 519–537.

KULASOVÁ, B., BOHÁČ, M., FIALA, T. (2008): Dopady změny klimatu na minimální průtoky. Sborník z Workshopu Adolfa Patery 2008 – Extrémní hydrologické jevy v povodí. ČVUT, Praha, ISBN 978-80-02-02113-1, 8 s.

KULASOVÁ, B. (2010): Současné přístupy a vývojové trendy v určování návrhových hydrologických veličin v ČR. Sborník z konference Hydrologické dny 2010, Hradec Králové, ČHMÚ, str. 339–346.

LLOYD-HUGHES, B., SAUNDERS, M., A. (2002): A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22, č. 13, str. 1571–1592.

MACUROVÁ, Z., HLAVČOVÁ, K., VÝLETA, R., SZOLGAY, J., LAPIN, M. (2010): Hydrologické scénáře zmeny odtokových pomerov pre budúce desaťročia. Sborník z konference Hydrologické dny 2010, Hradec Králové, ČHMÚ, str. 7–24.

MAJERČÁKOVÁ, O. et al. (1997): The variability of hydrological series due to extreme climatic conditions and the possible change of the hydrological characteristics with respect to potential climate change. In: *FRIEND '97 - Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management* (ed. by A. Gustard), IAHS Publ. 246., str. 59–66

MAJERČÁKOVÁ, O., ŠKODA, P., ŠŤASTNÝ, P., FAŠKO, P. (2004): Vývoj zložiek hydrologickej bilancie za obdobia 1931–1980 a 1961–2000. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 52, č. 4, str. 355–364.

MIKLÁNEK, P., PEKÁROVÁ, P., PEKÁR, J., ŠKODA, P. (2007): Regionalisation of Slovak rivers with respect to climate change in 1930–2005 and their sensitivity to QBO and NAO phenomena. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen). Finnish Environment Institute, Helsinki, str. 326–331

MOŽNÝ, M. (2004): Hodnocení sucha na území ČR v letech 1891–2003. In: *Seminář „Extrémy počasí a podnebí“*, ČHMÚ, Brno, 11.3.2004, CD, ISBN 80-86690-12-1.

MUNZAR, J. (2004): Příklady extrémního sucha na území České republiky v 16.–19. století. In: *Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed.): Seminář „Extrémy počasí a podnebí“*, Brno, 11. března 2004, ISBN 80-86690-12-1, 5 s.

NĚMEC, J., KOPP, J., ed. (2009): *Vodstvo a podnebí v České republice*. MŽP, Praha, 255 s.

NIASSE, M. (2005): *Climate-Induced Water Conflict Risks in West Africa: Recognizing and Coping with Increasing Climate Impacts on Shared Watercourses*. An

International Workshop on Human Security and Climate Change, Asker, 21–23 June 2005, 15 s.

NOVICKÝ, O., VYSKOČ, P., VIZINA, A., KAŠPÁREK, L., PICEK, J. (2008): Klimatická změna a vodní zdroje v povodí Vltavy. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, ISBN 978-80-85900-79-8, 30 s.

NOVICKÝ, O., KAŠPÁREK, L., FRIDRICHOVÁ, R., MRKVIČKOVÁ, M., HORÁČEK, S., FIALA, T., BRZÁKOVÁ, J., KOURKOVÁ, H., TREML, P., VACULÍK, M. (2010): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Úkol VÚV T.G.M. 2051, zpráva za rok 2010, VÚV T.G.M., Praha, 171 s.

OHMURA, A., BENISTON, M. et al. (1996): Simulation of climate trends over the Alpine regions. Development of a physically-based modelling system for application to regional studies of current and future climate. Final scientific report No. 4031-33250, Swiss National Science Foundation, Bern, 196 s.

PEKÁROVÁ, P., HALMOVÁ, D., MIKLÁNEK, P., PEKÁR, J. (2008): Analýza zmien N-ročných minimálnych prietokov rieky Dunaj v stanici Bratislava za obdobie rokov 1867/77–2005/06. Acta Hydrologica Slovaca, 9, č. 2, str. 252–261.

PEKÁROVÁ, P., PEKÁR, J. (2002): Použitie Hodrickovho-Prescottovho filtra na určenie dlhodobého trendu hydrologických radov. Acta Hydrologica Slovaca, 3, č. 2, str. 203–212.

PETERSON, L., HAUG, G. (2005): Climate and the Collapse of Maya Civilization. American Scientist, 93, č. 4, str. 322–327.

PODLAHA, A. (2003): Vliv geografických faktorů na režim minimálního odtoku v povodích České republiky. Magisterká práce, KFGG PřF UK, Praha, 158 s.

REBETEZ, M., MAYER, H., DUPONT, O., SCHINDLER, D., GARTNER, K., KROPP, J., P., MENZEL, A. (2006): Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. Annals of Forest Science, 63, č. 6, str. 569–577.

SCHREIBER, P., DEMUTH, S. (1997): Regionalization of low flows in southwest Germany. Hydrological Sciences Journal, 42(6), str. 845–858.

SPITZ, P., HEMERKA, I. (2005): Dlouhodobá potřeba závlahové vody jako ukazatel pro posouzení hypotézy nárůstu výskytu zemědělského sucha v klimatu České republiky. In: Sborník příspěvků z konference Hydrologické dny 2005, SHMÚ, Bratislava, 13 s.

STAHL, K., HISDAL, H., HANNAFORD, J., TALLAKSEN, L., M., van LANEN, H., A., J., SAUQUET, E., DEMUTH, S., FENDEKOVÁ, M., JÓDAR, J. (2010): Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7, str. 5769–5804.

STŘEŠTÍK, J. (2002): Srážková bilance a průtoky vody ve Vltavě za dvě století. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed.): XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference, Lednice na Moravě 2.–4. září 2002, ISBN 80-85813-99-8, str. 412–419.

SZOLGAY, J. (2007): Zmeny hydrologickeho režimu v dôsledku klimatickej zmeny a ich vodohospodárske dôsledky. In: Škultétyová, I., ed. (2007): AQUA 2007 - Zborník prác z vedecko-odbornej konferencie. Trenčín, 20.6.2007, Slovenská technická univerzita v Bratislave, ISBN 978-80-227-2692-4, str. 24–33.

ŠIPIKALOVÁ, H., ŠKODA, P., MAJERČÁKOVÁ, O. (2003): Nové hodnotenie hydrologických charakteristík. *Vodohospodársky spravodajca*, 4, Združenie zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve na Slovensku, Bratislava, str. 21–23.

ŠTEVKOVÁ, A., KOHNOVÁ, S., HLAVČOVÁ, K., BOHDALOVÁ, M. (2010): Regionálna typizácia výskytu minimálnych priemerných denných prietokov na Slovensku. *Acta hydrologica Slovaca*, 11, č. 1, str. 36–45.

TALLAKSEN, L. M., VAN LANEN, H., A., J., eds. (2004): *Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Elsevier, Amsterdam, 579 s.

TODOROVIC, M. (2007): Monthly climatic water balance of the Apulia region (Southern Italy): analysis of historical weather data and projections for the 21st century. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen). Finnish Environment Institute, Helsinki, str. 463–469

TOLASZ, R., ROŽNOVSKÝ, J., VALTER, J., KOHUT, J., KOTT, I. (2004): Hodnocení sucha roku 2003 na území ČR. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed): *Seminář „Extrémy počasí a podnebí“*, Brno, 11. března 2004, ISBN 80-86690-12-1, 10 s.

TRNKA, M., KYSELÝ, J., MOŽNÝ, M., DUBROVSKÝ, M. (2008): Changes in Central-European soil-moisture availability and circulation patterns in 1881–2005. *International Journal of Climatology*, 29, č. 5, str. 655–672.

VIZINA, A., KAŠPÁREK, L., KNĚŽEK, M., KAŠPÁREK, J., UHLÍK, J., FRIDRICHOVÁ, R., RAKOVEC, O., HORÁČEK, S. (2009): Vodní bilance

v podmínkách klimatické změny v povodí horní Metuje. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, Praha, 126 s.

VOJTEK, M., FAŠKO, P., ŠŤASTNÝ, P. (2003): Some selected snow climate trends in Slovakia with respect to altitude. Acta Met. Univ. Comeniana, vol. 32, str. 17–27.

VOREL, Č. (1937): Sucha na území Československé republiky v posledních desíletích. Zprávy veřejné služby technické, Státní ústav hydrologický a hydrotechnický T.G.Masaryka, Praha, 13 s.

6 Seznam zkratk a výrazů

PDSI: Palmer Drought Severity Index (Palmerův index drsnosti sucha)

SPI: Standardized Precipitation Index (Standardizovaný index srážek)

M-denní průtok: průměrný denní průtok, jehož hodnota je dosažena nebo překročena M dnů v roce. Např. průtok Q_{330} je v hydrologickém roce dosažen nebo překročen 330krát.

p-procentní průtok: průtok (zpravidla průměrný denní), který je v hydrologickém roce dosažen nebo překročen v p-procentech případů (např. $Q_{70\%}$)

N-letý průtok: průtok, který se v dlouhé časové řadě vyskytne v průměru jednou za N let (např. 100-letý průtok)

Sedmidenní roční minimální průtok: nejmenší průtok v roce vybraný z řady klouzavých průměrů sedmi po sobě jdoucích průměrných denních průtoků.

CN: Curve Number. Způsob výpočtu přímého odtoku při známé výšce srážky na povodí. Srážka je rozdělena na efektivní dešť a ztráty podle čísla CN křivky, které reprezentuje vlastnosti povodí (land-use, půdní poměry a stav nasycenosti povodí).

CTPA: statistický software Change and Trend Problem Analysis

7 Prohlášení spoluautorů upřesňující autorský podíl na uvedených publikacích

NOVICKÝ, O., KAŠPÁREK, L., FRIDRICHOVÁ, R., MRKVIČKOVÁ, M., HORÁČEK, S., FIALA, T., BRZÁKOVÁ, J., KOURKOVÁ, H., TREML, P., VACULÍK, M. (2008): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Úkol VÚV T.G.M. 2051, zpráva za rok 2008, VÚV T.G.M., Praha, 57 s.

autorský podíl (Fiala, T.): 50 %

.....
Ing. Hana Kourková

FIALA, T., OUARDA, T., HLADNÝ, J. (2010): Evolution of low flows in the Czech Republic. Journal of Hydrology, 393, str. 206–218.

autorský podíl (Fiala, T.): 80 %

.....
Ing. Josef Hladný, CSc.

KULASOVÁ, B., BOHÁČ, M., FIALA, T. (2008): Dopady změny klimatu na minimální průtoky. Sborník z Workshopu Adolfa Patery 2008 – Extrémní hydrologické jevy v povodí. ČVUT, Praha, ISBN 978-80-02-02113-1, 8 s.

autorský podíl (Fiala, T.): 33 %

.....
Ing. Miloň Boháč

8 Články 1 – 6

Článek 1

NOVICKÝ, O., KAŠPÁREK, L., FRIDRICHOVÁ, R., MRKVIČKOVÁ, M.,
HORÁČEK, S., FIALA, T., BRZÁKOVÁ, J., KOURKOVÁ, H., TREML, P.,
VACULÍK, M. (2008): Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách
klimatické změny na území České republiky. Úkol VÚV T.G.M. 2051, zpráva za rok
2008, VÚV T.G.M., Praha, 57 s.

ČASOVÁ A PLOŠNÁ VARIABILITA HYDROLOGICKÉHO SUCHA V PODMÍNKÁCH KLIMATICKÉ ZMĚNY NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY

Evidenční číslo projektu SP/1a6/125/08

Číslo úkolu VÚV T.G.M 2051

Zpráva za rok 2008

Řešitelé:

**Ing. Oldřich Novický
Ing. Ladislav Kašpárek, CSc.
Ing. Renata Fridrichová
Bc. Magdalena Mrkvičková
Ing. Stanislav Horáček
Mgr. Theodor Fiala
RNDr. Jitka Brzáková
Ing. Hana Kourková
Mgr. Pavel Tremel
Ing. Michal Vaculík**

**Zadavatel:
Ministerstvo životního prostředí**

Praha, listopad 2008

Obsah

1 ÚVOD.....	2
2 LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	2
2.1 Úvod.....	2
2.2 Definice sucha.....	3
2.3 Typy sucha.....	4
2.4 Příčiny sucha.....	7
2.5 Následky sucha.....	8
2.5.1 Dopady na vodní hospodářství.....	8
2.5.2 Dopady na zemědělství.....	9
2.5.3 Dopady na ekonomiku.....	9
2.5.4 Dopady na ekosystémy.....	10
2.5.5 Socioekonomické dopady a migrace obyvatelstva.....	10
2.6 Kvantifikace sucha.....	11
2.6.1 Indexy využívající jen srážkové úhrny.....	11
Index relativního množství srážek.....	11
Metoda decilů.....	11
Ukazatel předchozích srážek.....	12
Index náchylnosti k suchu.....	12
Standardized Precipitation Index (SPI).....	12
2.6.2 Indexy využívající hodnoty teplot a srážek.....	12
De Martonnův index.....	12
Metoda součtových řad.....	13
Dry spell method.....	13
2.6.3 Komplexní indexy.....	13
Palmer Drought Severity Index (PDSI).....	13
Crop Moisture Index (CMI).....	14
Keetch-Byram Index.....	14
Surface Water Supply Index (SWSI).....	14
2.7 Metody a nástroje pro hodnocení hydrologického sucha.....	15
2.7.1 Charakteristiky minimálních průtoků.....	15
2.7.2 Analýza nedostatkových objemů a trvání.....	16
2.7.3 Metody regionálního hodnocení sucha.....	18
2.8 Změny v průtocích a výskytu hydrologického sucha ve světě.....	18
2.8.1 Trendy a kolísání průtoků v nedávné minulosti.....	18
2.8.2 Předpovědi vývoje vodnosti v budoucnosti.....	20
2.8.3 Vliv změny klimatu na malé průtoky.....	22
2.8.4 Vliv využívání půdy a její pokrývky na odtok.....	23
Literatura.....	24

1 ÚVOD

Předložená výzkumná zpráva shrnuje výsledky prvního roku řešení tříletého (2008 – 2010) výzkumného projektu SP/1a6/125/08 s názvem Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. V rámci tohoto roku byla hlavní pozornost věnována shromáždění a utřídění informací formou literární rešerše, přípravě datových souborů pro časovou a prostorovou analýzu hydrologického sucha v České republice a přípravě metodického postupu hodnocení hydrologického sucha a jeho ověření na vybraném souboru vodoměrných stanic.

Kapitola 2 shrnuje poznatky získané při studiu literatury. Jsou v ní ukázány pohledy na definici sucha, představeny typy sucha, rozebrány příčiny a dopady sucha (na vodní hospodářství, zemědělství, ekosystémy, ekonomiku, socioekonomickou sféru a migraci obyvatelstva). Jsou ukázány možnosti, jak je možno kvantifikovat sucho podle různých indexů (ať již využívají hodnot srážek a teplot vzduchu nebo pouze samostatných srážek). Jsou představeny metody a nástroje hodnocení hydrologického sucha (minimální průtoky, analýza nedostatkových objemů, regionální hodnocení). V další části textu je provedena rešerše výskytu a možných příčin sucha ve světě (výskyt v minulosti, predikce vývoje sucha v budoucnosti, vliv změny klimatu, souvislost sucha a využití půdy) a v České republice (vztah výskyt sucha a minimální průtoky, vliv charakteristik povodí, regionální studie hodnocení sucha, vliv změny klimatu). Závěr 2. kapitoly je věnován dokumentům Evropské unie, které se týkají problematiky nedostatku vody a sucha.

Kapitola 3 se věnuje zpracování nedostatkových objemů a trvání deficitních období.

Následuje závěrečný souhrn nejdůležitějších poznatků získaných při zpracovávání práce a přehled použité literatury.

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

2.1 Úvod

Sucho jako jedno z největších přírodních nebezpečí člověka je běžným, opakujícím se rysem klimatu. Nejedná jen o zřídka se vyskytující jev, který je typický pro semi-aridní a aridní oblasti světa, ale větší či menší frekvencí a intenzitou postihuje lidstvo ve všech klimatických oblastech. Desai a Mishra (2006) uvádějí, že v období 1967 - 1992 byla různými druhy sucha zasažena polovina obyvatelstva celého světa a přímé a nepřímé následky sucha způsobily smrt 1,3 miliónu lidí.

Při úvahách o problému sucha je třeba rozlišovat mezi termíny sucho, aridita a desertifikace. Pro všechny je společným rysem nedostatek vody, nicméně mezi těmito pojmy existují rozdíly.

Sucho v určité oblasti je vždy vlastností přechodnou, v běžném stavu se vyskytuje vody dostatek. Způsobují ho klimatické výkyvy a charakterizují ho podprůměrné množství a špatná dostupnost vody v různých částech hydrologického cyklu (Ogallo, Gbeckor-Kove 1989).

Termínem sucho tedy označujeme nedostatek vody pro nějakou potřebu v určitém časovém úseku a na určitém území. Voda může být využívána buď přirozenými ekologickými systémy,

nebo slouží pro potřeby lidí a jejich aktivit. Termín sucho, bez dalšího zpřesnění, je pojem velmi obecný. Konkrétní význam získává až přívlastkem, který udává, k jaké potřebě vody jej vztahujeme. Jako základní se používají termíny sucho meteorologické, zemědělské, hydrologické, socio-ekonomické.

Naproti tomu pojem aridita vyjadřuje více či méně trvale suché klima, které se v krajině projevuje vznikem polopouštního nebo pouštního prostředí. V aridním území je proto sucho spíše pravidlem než výjimkou. Oblasti aridního a vlhkého klimatu spojují oblasti semiaridní, polopouštní. Právě tato místa na Zemi bývají velmi často postižena suchy (Gibbs a kol. 1975). Mezi ariditou a suchem existuje kromě výše zmíněného časového rozdílu i rozdíl prostorový. Aridita je z definice omezena na území s malými srážkovými úhrny (a zpravidla vysokými teplotami), sucho se teoreticky může vyskytnout v kterémkoliv klimatickém režimu na Zemi.

Desertifikaci rozumíme dlouhodobou změnu ekosystému. Jedná se o soubor geologických, klimatických, biologických a lidských faktorů, které vedou k degradaci fyzického, chemického a biologického potenciálu krajiny v aridních a semiaridních oblastech (kolektiv NDMC 2004). V desertifikaci postižených oblastech ztrácí zranitelný ekosystém svoji regenerační schopnost. Lze pozorovat zvyšující se intenzitu procesů vedoucích k přeměně krajiny v poušť. Často se tak děje v oblastech semiaridních, kde se zvýšil antropický tlak na využití krajiny (Ogallo, Gbeckor - Kove 1989).

2.2 Definice sucha

Definovat sucho je poměrně složité. Jedním z důvodů je jeho plošný rozsah. Sucho se zpravidla rozšíří na daleko větším území než jiné nebezpečné jevy, jako např. povodeň nebo tornádo. Navíc sucho není jen otázkou meteorologickou, ale promítá se do všech složek činnosti člověka, především do vodního hospodářství a do zemědělství a tím i do socioekonomické sféry. Heterogenita krajiny, její různorodá schopnost přizpůsobit se suchu spolu s jeho plošně variabilní intenzitou přináší problémy při stanovování rozsahu sucha.

Jedna z nejstarších definic pochází od Russella z konce 19. století. Suchem označuje období několika měsíců či let, kdy málo prší, zem je spálená, tráva mizí, úroda je nicotná a ovce a skot hynou (Hounam a kol. 1975).

Sucho je otázkou velikosti poptávky po vodě a její momentální disponibilní zásoby. Výsledkem nedostačujícího množství vody je sucho a nejjednodušší definice sucha proto říká, že sucho je nedostatek (deficit) vody.

Tuto zjednodušenou představu se snaží mnozí autoři blíže specifikovat. Jedna z definic říká, že suchem obecně rozumíme stav, kdy množství vody, které je k dispozici, nepostačuje pokrýt nároky na její využití. Přičemž nároky mohou být fyziologické potřeby rostlin, zvířat nebo člověka, minimální průtoky nutné pro odběr vody průmyslovými zařízeními nebo úpravami vody aj. (Gibbs a kol. 1975).

Jiná definice říká, že sucho značí nedostatečné množství vody, které po určitý časový úsek sužuje určité území (Rao 1987). Za sucho lze také označit deficit srážek, jehož výsledkem je množství vody, které nedostačuje úrodě, úpravám vody, rekreaci a dalším subjektům (kolektiv NDMC 2004).

Tallaksen a van Lanen ed. (2004) zdůrazňují, že se jedná o odchylku od normálního stavu. Definují proto sucho jako přetrvávající a plošně rozsáhlý výskyt podprůměrného (podnormálního) množství vody. Záporná odchylka může vyjadřovat nedostatek srážek, malou vlhkost půdy, nízkou hladinu podzemních vod nebo malé průtoky.

Kromě toho je důležité si uvědomit, že sucho může být vnímáno v různých částech světa různě. Roční srážkový úhrn 800 mm bude pro Žatecko znamenat vlhký rok, zatímco v západním Norsku se bude jednat o velmi suché období. Pěstitel zeleniny bude nespokojen s množstvím srážek v době, kdy si jejich nedostatku pastevci ovčí ani nevšimne. Palmer (1965) proto správně připomíná, že je třeba k suchu přistupovat jako k relativnímu pojmu. Absolutní vymezení lze využít jen bodově nebo v plošně omezené oblasti.

2.3 Typy sucha

Existuje řada definic, které se týkají konkrétního typu sucha. Prvotní příčinou je však vždy **sucho meteorologické**. To lze jednoduše definovat jako období, kdy jsou zaznamenány srážky nižší než dlouhodobý normál. Problémem je nejednotnost v pojetí hranice, která je brána za prahovou hodnotu nutnou pro vyhlášení sucha. Níže jsou zmíněny některé z definic sucha, které byly použity pro stanovení sucha v různých částech světa. Za meteorologické sucho je považováno období, kdy:

- a) je 15 dní zcela beze srážek,
- b) roční úhrn srážek klesne oproti dlouhodobému průměru o více než 1,3násobek směrodatné odchylky,
- c) srážkový úhrn posledních 21 dnů nedosáhne jedné třetiny normálu,
- d) spadne 60 % a méně dlouhodobého ročního průměru srážek po 2 a více po sobě jdoucích letech na nejméně polovině plochy regionu,
- e) měsíční úhrn srážek klesne na 60 a méně % hodnoty dlouhodobého normálu,
- f) roční úhrn srážek klesne na 75 a méně % hodnoty dlouhodobého normálu,
- g) v 15 po sobě jdoucích dnech není naměřen denní úhrn větší než 1 mm,
- h) spadne méně než 2,5 mm srážek za 48 hodin (Ogallo, Gbeckor-Kove 1989).

Někteří autoři kromě meteorologického sucha používají i termín atmosférické sucho, aby zdůraznili stav, kdy se zároveň vyskytuje velmi malá vlhkost vzduchu, vysoká teplota, silný vítr a intenzivní sluneční záření. Tyto faktory mohou údajně při určité kombinaci způsobit usychání rostliny i v případě, kdy je vlhkost půdy očividně dostatečná (Hounam a kol. 1975). Jiní autoři používají termín atmosférického sucha prakticky pro označení toho meteorologického. Například Antal a Glantz ed. (1988) tvrdí, že se jedná o stav atmosféry, jehož výsledkem je - pro daný časový interval - podprůměrné množství srážek.

Agronomické sucho přichází ve chvíli, kdy půda neposkytuje dostatek vláhy rostlině po určitý čas a kdy se nedostává vody chovaným zvířatům. Někteří autoři namítají, že problém zásoby vody pro hospodářská zvířata není závislý na množství půdní vláhy, a proto ho do této kategorie neřadí (Hounam a kol. 1975). Agronomické sucho je proto někdy chápáno jako čistě záležitost rostlinná, tj. jako stav, kdy je v půdě vody tolik, že nestačí pokrýt potřebu dané plodiny. Mluvíme pak o suchu fyziologickém, které lze definovat jako stav, kdy objemový podíl vody v půdním profilu klesá pod zvolenou hodnotu, např. bod vadnutí (Stehlík 1996).

Někteří autoři teprve nedostatek vody v půdě považují za skutečné sucho. Thornthwaite (In: Subrahmanyam 1967) říká, že sucho nezačíná ve chvíli, kdy přestane pršet, ale tehdy, když se kořeny rostlin nedostanou k půdní vláze. Shantz (In: Subrahmanyam 1967) vztahuje k půdní vláze skutečný smysl sucha: to se objevuje ve chvíli, kdy klesne zásoba vody v půdě natolik, že vegetace není dále schopna absorbovat takové množství vody, které vydá transpirací. Howell ed. (1972) upozorňuje ve svém pojetí sucha na zpětnou vazbu. Definuje totiž sucho jako období nedostatku vody, které ovlivňuje nejen růst rostlin, ale také naše rozhodnutí, co a jak pěstovat.

Příčinou agronomického sucha je také sucho meteorologické a úzce souvisí se suchem hydrologickým. Významným způsobem ho však ovlivňuje i charakter lokality, jako jsou geomorfologické a pedologické poměry a typ vegetace. Také agronomické sucho lze vymezit různým způsobem. Nedostatek srážek, který způsobí celkové uschnutí plodiny, zcela jistě označíme za sucho. V případě, kdy nízké hodnoty srážek ovlivní úrodu jen částečně je vhodné zvolit hranici, která určí suchem ovlivněný výnos.

Příklady kritérií pro stanovení agronomického sucha a státy, které je využívají jsou následující:

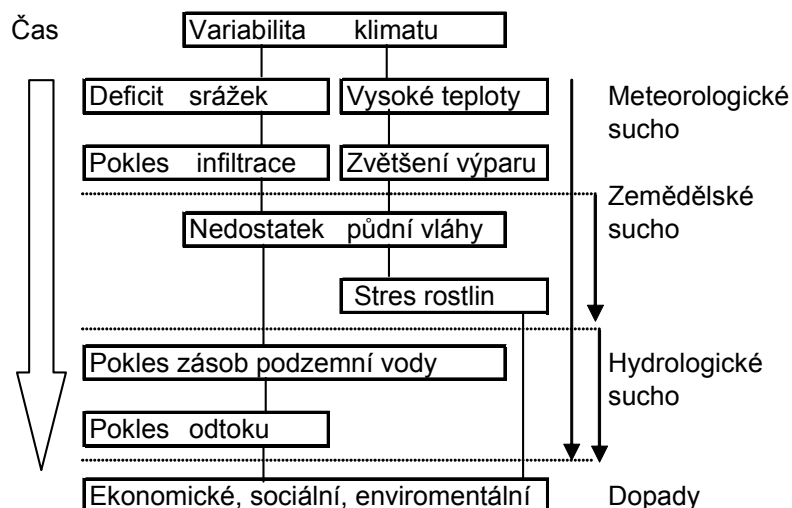
- a) snížení vlhkosti půdy o 10 % oproti normálu (Botswana),
- b) měsíční úhrn srážek nepřesáhne hodnotu potenciální evapotranspirace (Madagaskar),
- c) dva a více měsíců se srážkami menšími než 75mm (sušší oblasti) resp. 200 mm (oblasti pěstování rýže, Malajsie),
- d) snížení výnosu obilovin o více než 45 % (Kypr).

Absence srážek se v přírodě projeví snížením povrchového odtoku a klesajícími hladinami vod v jezerech a nádržích. Vzniká **hydrologické sucho**, které je charakterizováno poklesem průtoků v tocích a dále poklesem hladin a zásob podzemní vody a následným zmenšením podzemního odtoku a poklesem vydatnosti pramenů. Hydrologické sucho vzniká pozvolněji, protože v hydrologickém systému je vždy odtok dotován ze zásoby podzemní vody, která i v situaci, kdy není doplňována průsakem vody ze srážek, se vyčerpává postupně. Hydrologické sucho může vzniknout, nebo pokračovat i v zimních podmínkách, pokud dlouhotrvající nízké teploty zamezují tání sněhu a atmosférické srážky se ukládají po řadu měsíců ve sněhové pokrývce.

Podobně jako u sucha meteorologického můžeme i to hydrologické vymezit na základě hodnot průtoků nebo výšek hladin, které jsou z dlouhodobého hlediska podnormální. Definice například říkají, že hydrologické sucho nastává:

- a) když průměrný průtok je menší než příslušný dlouholetý průměrný měsíční průtok v daném měsíci (Vorel 1937)
- b) když se vyskytnou alespoň tři měsíce, ve kterých je měsíční průtok menší nebo roven 60 % dlouhodobého průtoky daného měsíce (Johanovský, Wolf 1985).
- c) když se vyskytne nejnižší průměrný denní průtok v daném roce, tj. každý rok se vyskytne jedno sucho (Gumbel 1963)
- d) když se v alespoň pěti po sobě jdoucích dnech vyskytne průtok s pravděpodobností překročení $p = 97,19 \%$, tj. Q_{355} (Řičicová a kol. 2003).

Časový sled dopadů meteorologického, zemědělského a hydrologického sucha znázorňuje **obr. 2.1.**



Obr. 2.1 Časový sled vývoje meteorologického, zemědělského a hydrologického sucha.
Upraveno podle National Drought Mitigation Centre,
<http://enso.unl.edu/ndmc/engima/def2.htm>

Pro zkoumání příčin, které vedou ke vzniku významných případů hydrologického sucha byl při zpracování příspěvků Kašpárek, Novický (1997), Lanen a kol. (1997) a Querner a kol. (1997) použit model hydrologické bilance BILAN (Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.M.), popsáný v Kašpárek (1998). Tento model využívá měsíční řady srážek, teplot a relativních vlhkostí vzduchu jako vstupní veličiny a modeluje územní výpar, průběh zásob vody v povodí (zásoby v půdě, ve sněhové pokrývce a zásoby podzemní vody) a základní složky odtoku (přímý a základní). Pro povodí z několika zemí ze západní a střední Evropy z podstatně odlišných klimatických oblastí a také s rozdílnou hydrogeologickou stavbou byly modelovány základní bilanční veličiny pro dlouhodobé řady obsahující případy hydrologického sucha. Ukázalo se, že na povodí, kde akumulární schopnost je v poměru k úhrnu srážek malá, vzniká hydrologické sucho již vlivem několikaměsíčního významného deficitu srážek. Povodí s významnou akumulární schopností, zejména v zásobě podzemní vody, nejsou na několikaměsíční deficity srážek citlivá, významné hydrologické sucho zde vzniká jako důsledek několikaletého snížení srážek.

Vliv teplot není jednoznačný. V období nezáporných teplot vyšší teploty přispívají k zvýšení výparu a k prohloubení sucha. U povodí, kde bývají souvislá zimní období se zápornými teplotami nastávají nejhorší období sucha tak, že vlivem dlouhodobého výskytu záporných teplot se prodlouží období sucha z léta a podzimu až do jarního tání.

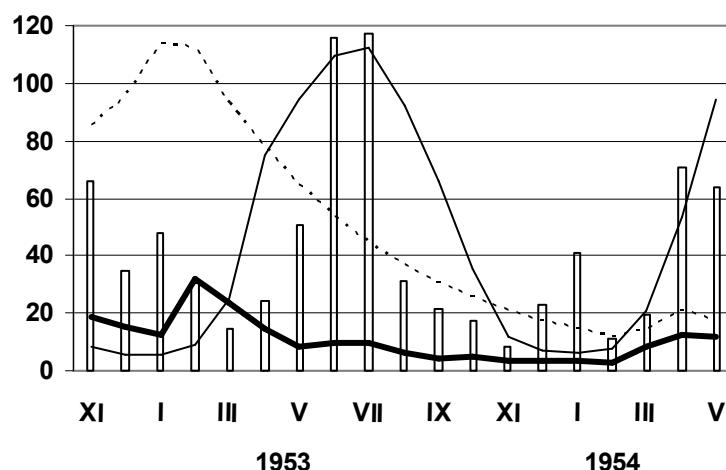
Tyto poznatky platí i pro podmínky v ČR, kde se vzhledem k rozmanitosti klimatických a hydrogeologických poměrů vyskytují jak povodí, ve kterých může odtok poklesnout do zanedbatelných hodnot již po několika měsících, tak povodí s významnou akumulací vody v křídových pánvích, ze kterých základní odtok v období sucha klesá zvolna, a nejsou známy případy, kdy by zanikl.

Hydrologické sucho v našich podmínkách můžeme rozdělit do tří typů:

- dlouhodobé, po několik let se prohlubující deprese přerušené jen krátkým jarním vzestupem - následek víceletého kolísání (poklesu) srážek
- krátké a hluboké deprese od jara do podzimu - následek velmi silného několikaměsíčního nedostatku srážek

c) deprese, kdy sucho z vegetačního období pokračuje přes celou zimu (většinou nejdelší a nejobjemnější poklesy), viz příklad sucha z let 1953 - 1954 na **obr. 2.2**.

Obecně je v našich podmínkách vznik hydrologického sucha v měřítku povodí Labe podmíněn situací, kdy se vyskytnou po několik měsíců srážkové výšky podstatně menší než potenciální evapotranspirace a zároveň je na počátku období zásoba vody podprůměrná.



Obr. 2.2 Časový průběh základních hydrologických veličin na povodí Labe po Děčín v průběhu sucha 1953 - 1954. Letní sucho z roku 1953 pokračovalo i v zimních měsících roku 1954, od ledna do března byly průměrné měsíční teploty na povodí Labe záporné. Legenda: sloupce - výšky srážek (mm.měsíc⁻¹), plná slabá čára - potenciální evapotranspirace (mm.měsíc⁻¹), plná silná čára - výšky odtoku (mm.měsíc⁻¹), přerušovaná čára - modelová zásoba podzemních vod (mm)

Důsledkem předchozích dějů je **sucho socioekonomické**. Lidská společnost si se svými zemědělskými a průmyslovými aktivitami klade značné nároky na množství vody. Pokud nároky společnosti převýší disponibilní zásoby vody, nastává socioekonomické sucho, které se může projevit v různých oblastech národního hospodářství.

Ekologické sucho je považováno (Estrela a kol. 2001) za nedostatek vody v ekosystému (např. v řece), který se projeví zhoršením jeho vlastností (např. zhoršením kvality vody).

Pojem edafické sucho představuje uměle navozené podmínky, při kterých byla zkoumána reakce různých druhů píce. Plodiny byly zasazeny v nádobách, které byly umístěny v mísách s vodou. Voda nebyla doplňována a byla sledována schopnost rostlin přežít po určitou dobu bez dodání vody. Výsledkem pokusů byly indexy odolnosti vůči suchu, které byly přiřazeny každému druhu pícniny podle toho, jak dlouho a jaké procento rostlin přežilo (Hounam a kol. 1975).

2.4 Příčiny sucha

Sucho je projevem určité odchylky běžných klimatických podmínek nad danou oblastí. V různých částech světa se mohou příčiny sucha lišit. Primární příčinou sucha je nedostatek srážek, především jejich neobvyklé načasování, distribuce a nízká intenzita ve vztahu

k existujícím zásobám vody a jejího využívání. Závažnost sucha může navíc zvýšit kombinace vysoké teploty vzduchu a s ní související vysoké evapotranspirace.

Příčiny nedostatku srážek se ve světě liší. V jižní Asii může nastat sucho kvůli zpoždění monzunových dešťů. V Africe je typickou příčinou neobvyklý posun intertropické zóny konvergence a s tím spojené anomální plošné zasažení území sezónními srážkami. Řada prací se také zabývá vlivem teploty vody oceánů na rozložení srážek např. v Sahelu (Druyan In: Gregory ed. 1988 a další). Prokázáný je také vliv fenoménu El Niño na výskyt sucha (např. Gregory ed. 1988). Při jeho průběhu zpravidla vysychá oblast jihovýchodní Asie a východní pobřeží Austrálie. Naopak na tichomořském pobřeží Jižní Ameriky jsou zaznamenány nadprůměrné srážky. Pro kvantifikaci tohoto jevu se využívá Southern Oscillation Index (SOI), který udává rozdíl tlaků vzduchu mezi Tahiti a Darwinem v Austrálii.

V Evropě má na rozložení teploty a srážek hlavní vliv rozmístění oblastí vysokého tlaku vzduchu. Změny v pozicích a setrvání blokujících anticyklón vedou ke změnám cirkulace, což má za následek teplotní a srážkové anomálie. Nad kontinentem se vytvoří mohutnější tlaková výše, která zabrání postupu frontálních systémů, které k nám přichází nejčastěji z Atlantického oceánu nebo Středozemního moře (Červený a kol. 1984). Například v letech 1995 - 1996 přetrvávala oblast vysokého tlaku vzduchu nad Skandinávií po dobu 16 měsíců. Výsledkem bylo sucho a horké vlny v létě 1995, dlouhá a studená zima a následné malé průtoky a zásoby vody v nádržích na jaře 1996 (Estrela a kol. 2001). Podobně jako u jevu El Niño se však sledují také velkoprostorové příčiny atmosférických anomálií. V Evropě byl v souvislosti se suchem prokázán vliv odchylek tlaku vzduchu nad severním Atlantikem. North Atlantic Oscillation Index (NAOI) udává rozdíl tlaků vzduchu mezi Islandem a Azorskými ostrovy, případně Lisabonem. Čím vyšší hodnoty indexu, tím intenzivnější proudění vzduchu od západu. Vysoké hodnoty indexu v zimě často korelují s výskyty sucha ve střední a jižní Evropě (Greatbach, In: Tallaksen, van Lanen 2004). Pro území České republiky však Doleželová (2006) významnou závislost indexu a srážkových úhrnů nezjistila.

Existují studie, které se snaží najít souvislost mezi cykly sluneční aktivity a suchými roky. Kemp (1990) objevil závislost cyklu slunečních skvrn a sucha s periodou 22 let, ovšem prokázal ji pouze pro Severní Ameriku a jen pro 50. a 70. léta 20. století. Známá jedenáctiletá perioda slunečních skvrn byla v souvislosti se suchem zjištěna i u více než 150leté řady srážek z indického Madrásu (Gibbs a kol. 1975).

2.5 Následky sucha

Následky sucha se projevují v mnoha oblastech lidské společnosti i přírodního prostředí. Je to tím, že voda plní důležitou úlohu v širokém spektru přírodních a antropogenních dějů. V době sucha se zvyšuje tlak na dodávky vody a pokud požadavky svou velikostí překročí disponibilní zásoby, jsou odběry vody omezeny, což nepříznivě ovlivňuje zemědělství, průmysl a další oblasti lidské činnosti. Zároveň se nedostatek vody projeví negativně na životním prostředí. Velikost následků závisí na délce trvání a intenzitě sucha. Důležité je si uvědomit, že se v průběhu sucha požadavky na množství vody zvyšují, neboť se vody nedostává na stále více místech (Pielke 2005). Konkrétně se může sucho projevit následujícími způsoby.

2.5.1 Dopady na vodní hospodářství

Při suchu je prioritou zajistit dostatek pitné vody pro obyvatelstvo. Při malých průtocích však může být voda v tocích méně kvalitní kvůli nedostatečnému zředění do ní vypouštěných

odpadních vod a její čištění v úpravnách vod může být problematické. Dochází k omezení dodávek pitné vody, případně k jejich úplnému zastavení. Voda musí být dovážena do postižených oblastí v cisternách. Méně vody přitékající do nádrže také znamená méně vody využitelné pro výrobu energie ve vodních elektrárnách.

Příkladem může být sucho, které zažila Evropa v létě 1976. V květnu toho roku potvrdilo francouzské ministerstvo zemědělství výskyt sucha a vydalo úřadům svých samosprávných celků pokyn, jak se zachovat v případě pokračujícího sucha. V červnu bylo použití vody k jiným účelům než k pití omezeno nebo zakázáno. Nádrže na řekách Seine a Marne, které jsou hlavními zdroji vody pro Paříž, začaly odpouštět více vody a průmyslové závody musely zároveň omezit vypouštění svých odpadních vod. Pro zajištění alespoň minimální distribuce vody do všech oblastí bylo zásobování veřejnými vodovody přerušováno na několik hodin denně a pitná voda byla také rozvážena cisternami za pomoci hasičů a armády (Estrela a kol. 2001).

2.5.2 Dopady na zemědělství

Oblasti užívání vody v zemědělství představuje především zavlažování. Dále se voda využívá na postřiky a jako pitná voda pro dobytek. Nedostatek vody se může projevit ve všech zmíněných oblastech. Sucho negativně ovlivní výnosy všech druhů plodin. Často dochází k omezení nebo přerušení dodávek závlahové vody, snižuje se množství půdní vláhy a rostlina uvadá. Mezi hospodářskými zvířaty potřebují nejvíce vody krávy chované na mléko - jedno zvíře více než 100 litrů za den (Hounam a kol. 1975). Při nedostatku vody se zvyšuje pravděpodobnost její infekce, snižuje se dojivost, zvířata ztrácí váhu, případně musí být i poražena.

V roce 1989 byla suchem postižena jižní Itálie. Tisíce hektarů zemědělské půdy na Sicílii a Sardinii nebylo možné zavlažovat. V letech 1993 - 1995 bylo z důvodů nedostatku vody zakázáno zavlažování na půl miliónu hektarech v povodí řeky Guadalquivir ve Španělsku. V souvislosti s výše zmíněným suchem ve Francii roku 1976 se snížila dojivost o 15 - 25 %. Českou republiku postihlo sucho např. v roce 2000. V jeho důsledku poklesl průměrný výnos jarní pšenice na 2,8 t/ha (oproti 3,9 t/ha v roce 1999). Finanční kompenzace zemědělcům za ztráty způsobené suchem činily 5 mld Kč (Brázdil 2002, Estrela a kol. 2001).

2.5.3 Dopady na ekonomiku

V hospodaření státu se sucho negativně projeví nejen ve výše zmíněných oblastech. Problémy mohou nastat i v dodávkách energie z vodních elektráren, což pocítí zvláště země závislé na energii z těchto zdrojů. Tepelné a jaderné elektrárny mohou potkat problémy při odběru vody na chlazení, neboť vody může být k dispozici málo a navíc může být příliš teplá a tudíž pro chlazení nevhodná. Suché a horké počasí také zvyšuje pravděpodobnost požárů a prашných bouří. Negativně může být ovlivněna i lodní doprava a rekreace související s vodou (koupání, vodní sporty apod.).

Norsko postihlo sucho v letech 1995 - 1996. Bylo způsobeno suchým podzimem a následnou mrazivou zimou. Na jaře 1996 byly průtoky na tocích tak malé, že musela být většina energie dovážena a ceny elektřiny významně vzrostly.

Maďarsko prožilo kruté období v letech 1983 - 1986. Kvůli suchu poklesly výnosy obilovin. Zároveň poklesly jejich ceny na světových trzích a se zvýšením vstupních nákladů se maďarské zemědělství ocitlo na „finančním suchu“. Celkový dluh 1500 farem dosáhl na konci roku 1986 hrozivých 12 miliard forintů. Farmy, které zaznamenaly pokles produkce o více než 20 %, získaly od státu daňové úlevy a finanční příspěvek na setbu do dalšího roku. Platby za závlahovou vodu byly dočasně zrušeny (Antal, Glantz ed. 1988).

V USA byly roční ztráty způsobené suchem vyčísleny na 6 - 8 miliard dolarů. Sucho se v různých částech země vyskytuje prakticky každoročně. V roce 1996 zasáhlo jižní státy a způsobilo snížení rostlinné i živočišné produkce, zvýšení počtu požárů, omezení dodávek pitné vody a zvýšení spotřeby energie. V samotném Texasu byly škody vyčísleny na 5 miliard dolarů. Stejná oblast byla, po silné epizodě El Niño, postižena i v letech 1998 a 1999 a kumulativní efekt se projevil v obrovských škodách (Wilhite a kol. 2000).

Maltu postihly suché roky v 70. letech 20. století. Významně musely být omezeny dodávky vody v rekreačních střediscích, což mělo na turistický ruch negativní dopad. Na počátku 80. let se kvůli stále klesajícímu počtu turistů přistoupilo k výstavbě dvou zařízení pro desalinizaci mořské vody (Perry, In: Gregory ed. 1988).

2.5.4 Dopady na ekosystémy

Prakticky každá rostlina potřebuje určité množství vody v půdě pro své dýchání (transpiraci). Pokud se množství vody sníží pod určitou úroveň, rostlina vadne a při přetrvávajícím suchu hyne. Po jejím rozkladu se povrch obnažuje a půda je více náchylná k erozi. V té chvíli může mít intenzivní déšť více negativní než pozitivní efekt. Může totiž způsobit vodní erozi, pokud je prudký natolik, že způsobí povrchový odtok.

Malé průtoky v řekách s sebou často přináší problémy s kvalitou vody. Kromě antropogenního ovlivnění (nedostatečné zředění odpadních vod) se mohou přirozeně měnit koncentrace některých látek. Pro malé průtoky je například charakteristická zvýšená koncentrace fosforu. Při vytvoření vodního květu pak dochází k nedostatku kyslíku ve vodě, což může ohrozit mnohé vodní živočichy. Akvatické prostředí může být ohroženo i tepelným znečištěním vody, například při vypouštění chladicí vody z elektráren (Estrela a kol. 2001).

Při jednom z největších such, které postihlo střední a jižní Evropu v létě 2003, zasáhly řadu států plošně velmi rozsáhlé požáry. Celkem bylo zničeno 650 000 ha lesa, nejvíce v Portugalsku a Španělsku. Škody v Portugalsku byly vyčísleny na více než 1 mld. euro (Tallaksen, van Lanen 2004).

Vážné dopady variability klimatu (všeobecný pokles srážek o 9% až 49% a pokles odtoku o 34% v období 1980 - 2003) v jihovýchodním Španělsku dokládá článek Martín-Rosales a kol. (2007).

2.5.5 Socioekonomické dopady a migrace obyvatelstva

Sucho má i vážné socioekonomické dopady. Pouštní oblasti se rozšiřují, to má za následek stěhování obyvatelstva do oblastí s většími zásobami vody. V oblastech chudých na vodu je problém i se zemědělstvím, které pokud je, odčerpává skromné zásoby vody, popřípadě v obdobích s dlouhým deficitem vody nemusí být plodiny čím zalévat, nesklidí se a může dojít bez pomoci ostatních zemí světa k hladomoru. Limitujícím faktorem je i vysoká cena vody.

Zatímco bohaté státy mohou nedostatku vody částečně čelit budováním potřebné infrastruktury pro rozvod vody a tím alespoň částečně eliminovat dopad sucha na obyvatelstvo, chudé rozvojové státy, které nemají dostatek finančních prostředků na vybudování potřebné infrastruktury, mu čelí jen stěží (největší problémy jsou v oblasti Sahelu). Jediným dlouhodobým řešením pro obyvatelstvo je proto stěhování. Tato migrace obyvatel pak přináší další problémy (vytváření chudinských čtvrtí na okraji velkých měst, částečně mezinárodní migrace apod.). V budoucnu bude možno očekávat i válečné konflikty kvůli nedostatku vody

2.6 Kvantifikace sucha

Vědecké výzkumy i praxe často vyžadují kvantifikaci přírodních a sociálních jevů. Kvalitativní stránka těchto jevů je nahrazována vyčíslením jejich parametrů, přičemž u mnohých je nutné počet vstupních parametrů redukovat neboť není možné všechny parametry vyčíslit.

Zjednodušení se nelze ubránit ani v případě sucha. Z důvodů nejednotné definice a komplexnosti tohoto fenoménu existují desítky způsobů, jak sucho kvantifikovat, přičemž je pravděpodobné, že se v budoucnu další způsoby ještě objeví. Indexy vypočtené z hodnot vybraných parametrů nám umožňují kvantitativní zhodnocení a vzájemné srovnání délky a intenzity suchých období.

Indexy sucha (případně indexy vlhkosti) můžeme rozdělit do několika kategorií podle toho, které parametry pro svůj výpočet potřebují a tím pádem který typ sucha kvantifikují. Jelikož primární příčinou je sucho meteorologické, nejpoužívanější charakteristikou jsou srážky, jejich množství, intenzita a rozložení v průběhu sledovaného období. Při výpočtu meteorologického sucha někteří autoři kromě srážek zohledňují i teplotu vzduchu, evapotranspiraci, délku slunečního svitu či rychlost větru.

Hydrologické sucho je počítáno z parametrů získávaných při měření v hydrologické síti. Při výpočtech se proto uplatňují data o průtocích, vydatnostech pramenů a změnách hladin v jezerech, nádržích, studnách a vrtech. Vysvětlení hydrologického sucha je na rozdíl od meteorologického komplikováno celou řadou dalších faktorů, jako jsou charakteristiky půdy a její užití, topografie a geologie území.

Výpočty agronomického sucha jsou založeny nejen na výběru nejrozličnějších agronomických, ale i meteorologických ukazatelů. Nejjednodušší indexy využívají pouze srážky, jiné jsou založené na poměrech aktuální a potenciální evapotranspirace. Agronomické parametry zahrnují charakter půdy, vlastnosti pěstované rostliny, konečný výnos a další. Agronomické sucho lze vyjádřit také množstvím vody spotřebované na závlahy či výši finančních kompenzací ztrát způsobených suchem.

2.6.1 Indexy využívající jen srážkové úhrny

Indexy, které využívají pouze naměřené množství srážek, jsou z hlediska výpočtu nejjednodušší. Existuje jich celá řada, proto jsou následující pouze příkladem z mnoha.

Index relativního množství srážek

Hodnota indexu se vypočítá jako podíl aktuálního množství srážek za dané období ku hodnotě dlouhodobého normálu. Index lze počítat za různě dlouhé období pro libovolnou srážkoměrnou stanici.

$$I = P / \mu(P) * 100, \quad (1)$$

kde P je aktuální množství srážek a $\mu(P)$ je dlouhodobý normál za dané období. Hodnoty nižší než 100 znamenají podnormální množství srážek. Platí zde tedy nepřímá úměra kdy s klesající hodnotou indexu roste pravděpodobnost výskytu sucha.

Metoda decilů

Srážkové úhrny mají ze statistického pohledu zřídka normální rozložení. Roční úhrny se často Gaussovskému rozložení blíží, ale histogramy měsíčních a především denních úhrnů vykazují značnou odchylku od křivky normálního rozložení. Z toho důvodu mají ukazatele průměru a

směrodatné odchylky malou vypovídací hodnotu. Je lepší využít například hodnoty percentilů (Gibbs a kol. 1975).

Metodu decilů využívá od 60. let 20. století pro vymezení období sucha Austrálie. Rozložení srážkových úhrnů za určité období je rozděleno na intervaly, které odpovídají 10 % celého rozložení (tzv. decilům). Příslušnost k jednotlivým decilům pak značí, zda se jednalo o období srážkově silně podprůměrné (první a druhý decil), podprůměrné (třetí a čtvrtý decil), atd. Pátý decil neboli medián je hodnota nepřekročená právě v 50 % případů.

Ukazatel předchozích srážek

Pro každý den v roce jsou z dlouhodobých denních srážkových úhrnů sečteny hodnoty za určitý počet předcházejících dnů (např. za 14 dnů, 1 měsíc nebo 1 rok). Rozdíl aktuálního množství srážek oproti dlouhodobému průměru (za stejné období) udává odchylku od normálu. Srážkovým úhrnům je možné podle časové vzdálenosti přiřazovat různé váhy. Pokud přenásobíme srážkový úhrn dne, který předcházel současnému o x dní, váhou $1/x$, snižujeme tím význam této srážky v závislosti na její době před současností. Největší význam pro stanovení sucha tak budou mít srážkové úhrny bezprostředně předcházející dnu, kdy nebezpečí výskytu sucha posuzujeme.

Index náchylnosti k suchu

Tento index je jednoduše definován jako poměr počtu bezesrážkových dnů ku celkovému počtu dnů studovaného období (Subrahmanyam 1967).

Standardized Precipitation Index (SPI)

Index SPI byl vyvinut v roce 1993 a stal se jednodušší alternativou Palmerova indexu PDSI (viz níže). Je založen na pravděpodobnostním rozložení srážek pro zvolené časové období. Technicky se jedná o násobky směrodatné odchylky od dlouhodobého průměru normalizované proměnné. Jelikož srážky za kratší časové období nemají normální rozložení, data jsou nejdříve transformována. Hodnocené období připadá do jedné ze sedmi kategorií podle hodnoty SPI, přičemž čísla větší než +2 respektive menší než -2 značí období extrémně vlhké respektive extrémně suché. Výhodami tohoto indexu je možnost výpočtu za různé časové období a různá území a také nenáročnost na vstupní data. Nevýhoda spočívá v přehlížení ostatních fyzickogeografických činitelů. Index SPI je nicméně široce využíván a jeho aktuální hodnoty pro území Spojených států lze nalézt na internetu (kolektiv NDMC 2006).

2.6.2 Indexy využívající hodnoty teplot a srážek

Srážky jsou bezpochyby určující pro stanovení množství vody, které je k dispozici. Jejich velikost nám však blíže neurčuje, zda jsou ve skutečnosti potřebné pro udržení dostatečné vlhkosti. Otázkou tedy je, jak vyjádřit toto množství.

Množství potřebné vody lze například vyjádřit potenciální evapotranspirací. Jelikož je však její kvantifikace obtížnější a množství dat velmi omezené, nahrazuje se teplotou vzduchu. Na ní závisí evapotranspirace, která se s její rostoucí hodnotou zvyšuje. Na způsobu poměrování teploty a srážek vznikla celá řada indexů sucha, z nich jsou některé dále uvedeny.

De Martonnův index

Tento index, který byl vyvinut v 30. letech 20. století, se počítá podle vztahu

$$dMI = P/(T+10), \quad (2)$$

kde P představuje měsíční úhrn srážek v mm, T je průměrná měsíční teplota ve °C. Jiným příkladem v této kategorii je Seljaninův hydrotermický koeficient.

Tento způsob využil Blinka (2005) pro stanovování období sucha z denních hodnot teploty a srážek. Pro každý den v roce vypočetl sumu průměrných denních srážkových úhrnů (daného období) za předchozích 365 dní. Srážkové úhrny byly váženy dle doby předstihu. Záporná odchylka konkrétního dne pak značila výskyt sucha. Ke srážkovým odchylkám pak autor analogicky spočetl odchylky teplotní. Součtem obou odchylek tedy získal vymezení suchých období na základě teploty i srážek, otázkou ovšem zůstává stanovení jejich vah. Celková odlišnost období vymezených pouze ze srážek a v druhém případě ze srážek i teploty ukazuje, že teplota vzduchu hraje při výskytu sucha významnou roli.

Metoda součtových řad

S problémem vážení srážkových úhrnů a teploty vzduchu se ve své práci vyrovnával i Sládek (2001). Užitím metody součtových řad přiřadil denním úhrnům srážek čísla od -1 do +9. Zápornou hodnotu získal den s nulovými nebo neměřitelnými srážkami. Kumulací těchto přiřazených hodnot vzniká řada čísel klesajících (v době sucha), respektive rostoucích (v deštivém období). Nalezením lokálních extrémů řady vymežíme období sucha, rozdílem jejich hodnot zjistíme míru deficitu srážek. Problém vážení teplot vyřešil Sládek jednoduše: pro vymezené období sucha spočetl sumu průměrných denních teplot přesahujících určitou mez (např. 0 °C). Pronásobením teplotní sumy s hodnotou rozdílu lokálních extrémů dostáváme index sucha S , který slouží k porovnání jednotlivých období sucha. Z původní práce (Sládek 1989), stejně jako z řady následujících (např. Weissová 2000, Kopečná 2002, Fiala 2006), vyplývá, že sucho se v České republice nejčastěji vyskytuje v období tzv. babího léta na přelomu září a října.

Dry spell method

Tento index uvažuje minimální průměrnou denní teplotu a maximální denní srážkový úhrn a zjišťuje počet dní s těmito parametry. Byl navržen ve studii Krysanova et al. (2008), kde byl použit při zjišťování dlouhodobého trendu sucha v povodí Labe. Pro tento ukazatel byl trend potvrzen i v lokalitách, kde byla změna při použití indexů SPI a PDSI nevýznamná.

2.6.3 Komplexní indexy

Palmer Drought Severity Index (PDSI)

První index, který využívá většího počtu proměnných a který je dodnes používán, představil Wayne Palmer v roce 1965. Výpočet indexu reflektuje kromě teploty a srážek také zásoby vody v půdě. Pro každé období (nejčastěji měsíc) je z rovnice vodní bilance vypočteno očekávané množství srážek, které je porovnáno s aktuální srážkou. Vzniklou odchylkou, váženou klimatickým indexem, získáváme index odchylky vlhkosti Z . Výslednou hodnotu indexu získáme z rekurzivní rovnice

$$PDSI_k = PDSI_{k-1} + \frac{Z_k}{3 - 0.103PDSI_{k-1}}, \quad (3)$$

kde k značí daný měsíc (týden apod.), $k-1$ měsíc předchozí.

Palmerův index je standardizován, proto je jeho výhodou možnost srovnání mezi měsíci i různými místy. Především v USA ho správní orgány využívají pro monitorování sucha a při rozhodování spojeném s jeho výskytem. Při vědeckých výzkumech se osvědčil při zhodnocování historických výskytů sucha. Index PDSI má také svoje nedostatky: nezahrnuje

do svých výpočtů sníh, veškeré srážky jsou brány jako déšť, což může v zimních měsících způsobit nepřesnosti. Nepočítá se s prodlevou mezi srážkami a odtokem, navíc odtok není vůbec brán v úvahu, dokud není kapacita půdy zcela zaplněna vodou, což vede k jeho podhodnocení. Palmerův index je nastaven tak, že pomaleji reaguje na změny zásob vody, hodí se tedy k dlouhodobějším analýzám. Jeho úpravou vznikl index CMI, který je na změny citlivější (Hayes 2006).

Crop Moisture Index (CMI)

Již v roce 1968 přišel Palmer s úpravou svého původního indexu a představil index CMI, který se zaměřuje na stanovení množství vody v kořenové zóně půdy. Do jeho výpočtu na rozdíl od PDSI vstupuje průměrná týdenní teplota vzduchu a týdenní úhrn srážek spolu s hodnotou CMI z předchozího týdne. Tento index tak rychleji reaguje na změny vlhkosti. Krátká intenzivní srážka ovšem může hodnotu indexu výrazně ovlivnit, což může být pro dlouhodobý pohled zavádějící. Krátký prudký déšť může půdě přinést vláhu na několik dní, celkové dlouhodobé podmínky však ovlivní spíše málo (kolektiv CAES 2006).

Keetch-Byram Index

Keetch a Byram navrhli tento index v roce 1968 speciálně pro stanovování rizika požáru. Je proto využíván hasiči v USA. Vstupy jsou zeměpisná šířka stanice, průměrný roční úhrn srážek a maximální teplota a úhrn srážek předešlého dne. Hodnota indexu vypovídá o deficitu vlhkosti v půdě a náchylnosti jejího organického materiálu k vznícení (USFS 2007).

Surface Water Supply Index (SWSI)

Vznik tohoto indexu byl výsledkem snahy vědců zohlednit v indexu PDSI také sněhové zásoby. SWSI byl vytvořen s důrazem na povrchový odtok a horské oblasti s potenciální sněhovou vrstvou. Do výpočtu vstupují čtyři proměnné: množství sněhu, průtok, srážky a zásoba vody v nádržích. Data za určitý časový úsek se shromáždí a normalizují podle svých dlouhodobých průměrů. Každá komponenta v povodí má svoji váhu podle toho, jakou měrou přispívá k zásobám vody v povodí. Index se používá od roku 1990 např. v americkém státě Montana. Výhodou indexu SWSI je dobré srovnání zásob vody v povodí, nevýhodou špatná porovnatelnost různých povodí a také nutnost recalibrace výpočtu při změně prvků vstupujících do výpočtu (Monacelli a kol. 2005).

Jak vyplývá z uvedeného přehledu indexů, jsou převážně zaměřeny na posuzování sucha ve vegetačním období, respektive v období mimo zimu. Vyplývá to zřejmě z toho, že ve většině států způsobuje největší problémy sucho zemědělské.

Pro posuzování nejdelších případů hydrologického sucha, které v našich podmínkách vzniknou tak, že na suchu z vegetačního období naváže zima s trvale zápornými teplotami, všechny srážky zůstávají ležet na povodí ve formě sněhové zásoby, infiltrace do půdy i hypodermický odtok zanikají (příkladem je sucho z let 1953 - 1954), jsme v literatuře vhodné indexové metody nenašli.

2.7 Metody a nástroje pro hodnocení hydrologického sucha

2.7.1. Charakteristiky minimálních průtoků

Hydrologické sucho je vždy spojeno s výskytem malých průtoků a nejjednodušší způsoby posouzení míry výjimečnosti určitého případu sucha využívají základní statistické charakteristiky průtoků.

Nejběžnější postup spočívá v tom, že nejmenší průtoky, které se v průběhu sucha vyskytly, porovnáváme s kvantily čáry překročení průměrných denních průtoků, které jsou v ČR uváděny ve stupnici m-denních průtoků. Čáry překročení průměrných denních průtoků se sestavují seřazením dat z dlouhodobých pozorování. Vzhledem k tomu, že extrémní minima průtoků se vyskytují jako součást dlouhých průtokových depresí, je dolní část čáry překročení většinou tvořena průtoky jen z několika málo let, kdy se tyto deprese vyskytly a kvantily z této oblasti jsou výsledkem jen těchto případů. Představa, že například průtok Q_{355d} (nejběžnější charakteristika minimálních průtoků užívaná v ČR) je běžně nedosažen 10 dní v roce, je chybná. V podstatné části let pod jeho hodnotu průtok vůbec nepoklesne a v některých letech pod touto hodnotou setrvá i mnohonásobně déle než 10 dní, viz (Kašpárek 1989). Tato hodnota je vypočtena ze zvoleného jednotného dlouhého období a je, stejně jako ostatní základní hydrologické charakteristiky aktualizována. V současné době jsou ještě stále používány údaje odvozené z pozorování 1931 - 1980, probíhá zpracování dat z nově zvoleného období 1961 - 2005.

Určitou nevýhodou hodnocení malých průtoků podle jednodenních průměrů také je (většinou) malá přesnost stanovení jednotlivého průměrného denního průtoků a naopak snadná možnost jeho ovlivnění. Řada evropských zemí používá pro posuzování rozkolísanosti průtoků čáry překročení průměrných průtoků z delšího intervalu, 7, 10 i více dní. Statistické charakteristiky z takových řad jsou méně náhodně ovlivněny. Využitím delšího intervalu průměrování také získáváme o hydrologickém suchu informace, které mají větší význam jak z hlediska ovlivnění ekologických systémů, tak z hlediska zásobování vodou. V letech 2001 - 2003 byl ve Výzkumném ústavu vodohospodářském řešen úkol, který vytvořil předpoklady pro využití charakteristik čar překročení z vícedenních průměrných průtoků i v ČR, viz Kašpárek a kol. (2002), Fridrichová, Boháč (2003). V ČR se tyto charakteristiky zatím prakticky neužívají, avšak v evropských zemích jednoznačně převažuje využití čar překročení vícedenních průměrných průtoků.

Alternativou k použití čar překročení (tj. využití celých pozorovaných řad) je odvození charakteristik z řad ročních minim. Také charakteristiky z řad ročních minim jsou statisticky definovány jako kvantily, ohodnocené buď pravděpodobností nedostoupení v procentech, nebo dobou opakování v letech. U nás se používaly řady minim průměrných denních průtoků, které sloužily jako podklad pro výpočet minimálních zbytkových průtoků. Metody výpočtu charakteristik teoretických rozdělení pravděpodobnosti z řad ročních minim jsou popsány ve studii Kašpárek a kol. (1988). Charakteristiky z průměrných průtoků za delší interval (například 7, 10 dní) byly předmětem výzkumu v projektu Labe (Kulasová 1993). Jsou méně citlivé na náhodná ovlivnění jednodenních minimálních průtoků, také z hlediska zachování podmínek pro živé organizmy v toku jsou považovány za vhodnější.

Všechny uvedené přístupy lze aplikovat i na průtoky rozlišené podle sezónního průběhu, například po měsících, prakticky se však taková zpracování téměř nepoužívají. Další charakteristiky používané pro hodnocení malých průtoků jsou uvedeny v Kašpárek, Novický (1999).

Ke zjištění hodnot malých průtoků v místech s krátkou řadou pozorování či nepozorovaných je možno použít data z blízkých stanic nebo odvodit požadovanou hodnotu pomocí určité regionalizace. Touto problematikou se zabývali pro rakouská povodí Laaha a Blöschl (2004), kteří porovnali metody pro odhad Q_{95} z krátkodobých měření. Nejvhodnější metodou bylo použití dat z nejbližší stanice po proudu, které poskytovalo lepší výsledky než jednoduchá regionalizace (na základě fyzicko-geografických podmínek) a složité regionalizace (kromě charakteristik povodí zohledňovala vzájemnou korelaci odtoků). Pro nepozorované profily bylo vyhodnoceno jako vhodnější opatřit si krátkodobou řadu měření než provádět odhad na základě regionalizace. V roce 2007 pak publikovali komplexní postup pro odvozování charakteristik malých průtoků v Rakousku, viz Laaha a Blöschl (2007).

Metodu pro odhad charakteristik malých průtoků odvozenou z Darcyho zákona a zákona zachování hmoty pro základní odtok, včetně testování na Flint River a Gasconade River (obě povodí o ploše cca 7000 km²) obsahuje studie Furey a Gusta (2000)

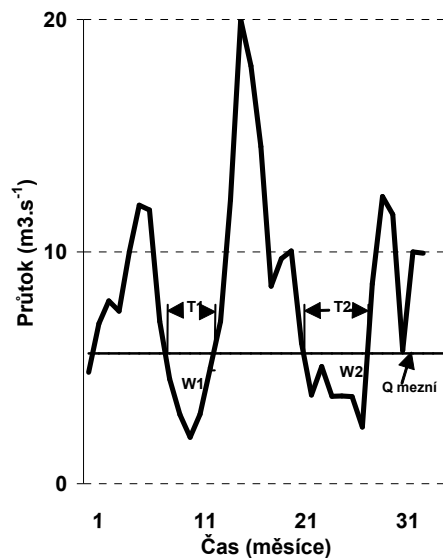
2.7.2 Analýza nedostatkových objemů a trvání

Popis hydrologického sucha podle nejmenšího dosaženého průtoku je nedostatečný, stále výrazněji se proto prosazuje komplexnější přístup, nazývaný analýza nedostatkových objemů a trvání. Jeho základem je volba mezního (prahového) průtoku. Ten můžeme v návaznosti na definici hydrologického sucha považovat za průtok, při kterém jsou zajištěny požadavky na užívání vody (zejména odběry) a minimální legislativou požadovaný průtok. V naprosté většině aplikací analýzy nedostatkových objemů a trvání je prahový průtok volen jako konstantní, rovný zvolenému kvantilu průtoku, nejčastěji z rozmezí $Q_{50\%}$ až $Q_{95\%}$. Jako prahový průtok však může být použit časově proměnný průběh průtoku, složený z opakujících se průběhů zvolených kvantilů průtoků stanovených pro každý den nebo měsíc v průběhu roku. Taková volba je patrně bližší potřebám přírodních systémů, které jsou na sezónní kolísání průtoků přivykly, zpracování tohoto typu jsou prozatím výjimkou.

Analýza nedostatkových objemů a trvání se zabývá popisem vlastností skutečných trvání období, kdy průtok je menší než mezní průtok, a popisem vlastností objemů, které chybí pro doplnění na mezní průtok, viz **obr. 2.3**. Při vymezení deficitních období v řadách denních průtoků se obvykle používá především zvolená minimální délka deficitního období (vyloučí se nepodstatné velmi krátké případy). Vhodné je i zajistit, aby krátkým obdobím přerušený pokles průtoků nebyl identifikován jako dva případy, ale jako jedno delší období. Podle výsledků rozsáhlého výzkumu této problematiky, viz Hisdal, Tallaksen (2000) lze například zvolit minimální hodnotu trvání mezi dvěma oddělenými případy poklesů. Velmi účinnou se ukázala metoda transformace denních průměrů na klouzavé (např. desetidenní) průměry. Popis této metodiky i aplikace v globálním výběru povodí uvádí publikace Fleig a kol. (2005).

Pro popis nedostatkových objemů a trvání deficitních období se používá několik charakteristik. Nejjednodušší z nich je průměrný počet výskytu deficitních období za rok. Další jednoduché charakteristiky jsou průměrné trvání poklesu pod mezní průtok a průměrná velikost nedostatkového objemu. Charakteristikami, které podává podrobnější informace, jsou čára nedostoupení nedostatkových objemů a čára nedostoupení trvání deficitních období.

Tyto čáry, získané z pozorování, lze statisticky modelovat pomocí různých typů teoretických rozdělení. Příklad takového postupu je v článku Engeland a kol. (2004).



Obr. 2.3 Trvání (T) poklesu průtoku pod mezním průtokem a odpovídající nedostatkové objemy (W)

Pokud je mezní průtok zvolen v oblasti minimálních průtoků, průběh čar nedostoupení nezačíná v bodě s nulovou pravděpodobností, neboť se vyskytují roky, ve kterých se nedostatkové období nevyskytlo. Jako jednu z charakteristik čar nedostoupení můžeme tedy použít hodnotu pravděpodobnosti vymezující oblast nulových trvání (objemů). Gradient nárůstu nedostatkových trvání i objemů s pravděpodobností nedostoupení se většinou zvětšuje od malých pravděpodobností až do oblasti kolem 80% pravděpodobnosti pozvolně, ve zbývajících částech velmi rychle. Nabízí se proto možnost použít jako ukazatele nedostatkových trvání a nedostatkových objemů jeden kvantil z oblasti malých pravděpodobností nedostoupení, druhý z oblasti pravděpodobností 80% (nebo méně) a třetí kvantil z oblasti maxim, například pro pravděpodobnost 95%.

Abychom mohli porovnávat nedostatkové objemy z různých povodí, je vhodné nedostatkové objemy vyjádřit jako relativní hodnoty, vyjádřené v procentech dlouhodobého ročního objemu odtoku. Pokud jde o trvání, není třeba výsledky, dané ve dnech nebo měsících, nijak normalizovat.

Výpočetní postupy, které vesměs využívají jako vstup řady průměrných denních průtoků, řeší různými způsoby sloučení „závislých“, tj. jen malým časovým úsekem oddělených poklesů průtoku pod prahovou hodnotu a odstranění „zanedbatelných“ případů s velmi krátkým trváním a malým nedostatkovým objemem. Výsledky pokusných výpočtů shrnuje práce, jedním z efektivních postupů při zpracování denních řad je vyhlazení řady pomocí například desetidenních klouzavých průměrů.

V roce 2000 byla zpracována studie Kašpárek, Novický (2000), jejímž účelem bylo porovnat metody a výpočetní programy, které jsou pro analýzu nedostatkových objemů v ČR k dispozici a získat názor na to, jak postupovat při hromadném zpracování dat.

Základním prostředkem dostupným v ČR pro výpočet nedostatkových objemů je program EXDEV Řiřica, Novický (1995), který byl sestaven v roce 1994 v rámci spolupráce Českého hydrometeorologického ústavu v mezinárodním projektu FRIEND. V rámci spolupráce ČR na tomto projektu byl v roce 2000 získán novější program ROZKLAD NIZOWKI, jehož autorem je Wojciech Jakubowski z katedry matematiky Zemědělské univerzity ve Wroclawi.

Pro zpracování analýzy nedostatkových objemů a trvání do úrovně empirických čar překročení lze považovat oba programy za rovnocenné, pokud potřebujeme aplikovat teoretická rozdělení, je vhodnější použít program ROZKLAD NIZOWKI, který je po řadě úprav distribuován pod názvem Low Flow Estimation i na CD jako příloha publikace Tallaksen and Lanen (2004). Výsledkem vlastního zpracování nedostatkových objemů a trvání poklesu průtoků pod zvolenou mezí tímto programem jsou výpisy parametrů teoretických rozdělení, tabulky a grafy čar nedostoupení. Použitý algoritmus vybírá nejvhodnější teoretické rozdělení nedostatkových objemů a trvání z typů Pearsonovo III, Weibullovo, log-normální, Johnsonovo, dvojité exponenciální a zobecněné Pareto rozdělení. Pro počet výskytů případů sucha v roce se vybírá buď rozdělení Poissonova nebo Pascalova.

Princip metody nedostatkových objemů se nevyužívá jen pro hodnocení hydrologického sucha. Ridolfi a kol. (2000) používá jako charakteristiky stresu z nedostatku vody pro vegetaci trvání stresu pod prahovou hodnotou vlhkosti půdy, sezónní četnost a průměrnou velikost deficitu. Pomocí stochastického modelování ekosystému v podmínkách omezených srážek zkoumá vztahy mezi uvedenými charakteristikami a parametry, které popisují vlastnosti klimatu, půdy i vegetace.

2.7.3 Metody regionálního hodnocení sucha

Aplikaci Weibullova rozdělení pro statistický popis prostorového a časového rozdělení období s nízkými úhrny srážek v Katalánsku (severovýchodním Španělsku) uvádí článek Lana a kol. (2008).

V posledních desetiletích se v literatuře objevily první pokročilé statistické metody regionálního hodnocení sucha, tj. metody, které popisují pomocí vícerozměrných statistických rozdělení vlastnosti hydrologického sucha nejen z hlediska časového průběhu, ale i z hlediska plošného rozsahu, případně jeho proměnný v čase. Jako příklad takového postupu pro meteorologické sucho lze uvést článek Henriquese a Santose (1999) i navazující aplikaci (Santos a Henriques, 1999).

2.8 Změny v průtocích a výskytu hydrologického sucha ve světě

2.8.1 Trendy a kolísání průtoků v nedávné minulosti

Práci zabývajících se vývojem průtoků vzniká velké množství, přičemž většina z nich popisuje kolísání a trendy odtoku. Vývoj vodnosti v posledních letech ve většině případů odpovídá změnám, které byly a dále jsou predikovány klimatickými a hydrologickými modely. Otázkou zůstává, jestli pozorované jevy skutečně představují významný trend způsobený klimatickou změnou, nebo jestli pouze odrážejí přirozenou variabilitu klimatu (Hisdal et al., 2001).

V Evropě lze největší rozdíly pozorovat mezi severem a jihem kontinentu. V oblasti Středozemního moře se množství srážek snižuje a proto zde dochází i k úbytku zásob povrchových a podpovrchových vod. V Apulii (Todorovic, 2007) spadlo v 50. letech 20. století o 22 % více srážek než v 80. letech. Brunetti et al. (2004) detekovali klesající trend v počtu srážkových dnů v Itálii. Piccarreta et al. (2004) pomocí testu trendu zjistili, že v jižní Itálii poklesl roční úhrn srážek za období 1923 - 2000 o 156 mm, přičemž nejvýznamnější úbytek připadá na zimu. Srážkové úhrny se snižují i na severu Afriky. V Oranu (Meddi, Talia, 2007) byly poslední roky nejsuššími od počátku pozorování v roce 1877.

Naopak na severu Evropy se srážkové úhrny v posledních letech zvyšují (Hisdal et al., 2007). Zároveň se zde ale zvyšuje i teplota vzduchu, stejně jako jinde v Evropě. Kombinace vyšší teploty a větších srážek přináší změny v odtokových režimech. V zimě odtok vzrůstá především u stanic v nižších nadmořských výškách (více dešťových srážek), na jaře roste nejvíce na horách (tání sněhu), v létě a na podzim jsou současné trendy statisticky nevýznamné. Větší množství srážek totiž kompenzuje vyšší teplota vzduchu a tím pádem vyšší evapotranspirace. Častější výskyt letního sucha však již byl i ve Skandinávii zaznamenán (např. v JV Norsku (Roald, Hisdal, Beldring, 2007)). Řady průměrných ročních průtoků vycházejí bez signifikantního trendu. Zvyšující se teplota vzduchu neovlivňuje pouze evaporaci, ale i další charakteristiky, např. délku trvání sněhové pokrývky. Ta se například v Lotyšsku zkrátila za posledních 60 let o 5 až 25 dní (Reihan, Loigu, 2007; Klavins, Rodinov, 2007). Roční odtok vody se v pobaltských státech mění podobným způsobem jako ve Skandinávii. Odlišné jsou tendence na jaře, kdy vodnost v Pobaltí klesá a jarní maxima se přesouvají do zimy. Srážkové úhrny v Pobaltí celkově rostou, avšak průtoky se zvyšují jen v zimě. V Británii se srážky snižují v různých částech země odlišně, navíc se srážkové deficity různě projevují v závislosti na pestré geologické stavbě území. Intenzivnější sucha v období 1962 - 1990 byla zjištěna v jihozápadní Anglii, Walesu a Skotsku (Hisdal et al., 2001).

Obrovský vliv má zvyšující se teplota vzduchu na oblasti, které jsou bohaté na sníh a led. Ledovce ve švýcarských Alpách obsahují ve srovnání s rokem 1840 co do objemu dvakrát méně ledu. Obecně se průtoky v horských oblastech v zimě signifikantně zvyšují (více dešťových srážek), v létě klesají. Podobný vývoj mají toky na Islandu (Jónsdóttir, Uvo, 2007). Kromě horských ledovců lze v této souvislosti uvést rekordně malé zalednění Arktidy v létě roku 2007. Grónský ledovec by měl podle současných modelových scénářů roztát v roce 2200.

Ve střední Evropě se srážkové úhrny a průměrné roční průtoky vyvíjejí poměrně nevýrazně. Například Degirmendžic et al. (2004) nevysledovali v ročních srážkových úhrnech Polska za období 1951 - 2000 žádný trend. Výjimku v tomto regionu představuje Maďarsko, kde v průběhu 20. století ubyly roční srážkové úhrny o 15 - 20 %. Největší úbytky připadají na jarní měsíce březen a duben a poté na podzimní měsíce září a říjen (Domonkos, 2003). Také výhled do budoucnosti nenaznačuje výrazné změny množství srážek, což by mohlo znamenat relativně stabilní vývoj ročních objemů odtoku vody. Střední Evropou prochází pomyslný pás, který odděluje severozápad kontinentu, kde se předpovídají zvyšující se srážky, od jihovýchodu, kde se očekává jejich snížení.

Výraznější změny lze očekávat v redistribuci srážek a průtoků v průběhu roku, což pravděpodobně ovlivní průměrné měsíční průtoky. V posledních letech dochází ve střední Evropě také ke zvyšování teploty vzduchu, což ovlivňuje odtok a zvyšuje pravděpodobnost výskytu hydrologického sucha. Na Slovensku došlo podle studie Majerčákové et al. (1997) od roku 1980 k prokazatelnému snížení ročního průtoků v 64 vodních tocích různých hydrologických režimů. Nejvýznamnější pokles byl zjištěn u podzimních a zimních měsíců. Co se týče prostorového rozložení, největší pokles průtoků připadá na jihovýchod území (o 30-40 %) a nejméně se snížil průtok na západě, severozápadě a severovýchodě Slovenska (o 5-10 %). Tyto závěry byly potvrzeny pozdější prací Miklánka et al. (2007). Sledování vydatnosti pramenů dává podobné výsledky, avšak velikosti trendů se významně liší oblast od oblastí. Podobné tendence naznačuje i studie Krysanové et al. (2008), jež hodnotila frekvenci výskytu suchých období v německé části povodí Labe. Pro období 1951-2003 různé metody (indexy SPI, PDSI a DS) prokázaly častější výskyt sucha v posledních letech.

Častější sucha však zcela jistě nejsou doménou pouze poslední doby. Řada studií dokládá výskyt extrémních such v minulých stoletích až do středověku. Indiciemi jsou v takových

pracích často zápisy z kronik nebo metoda dendrochronologie (viz např. Burn et al., 2004). Přesnější kvantifikace je však možná až z období přístrojových pozorování, tj. zpravidla z 20. století. Sucha v první polovině 20. století zmiňují například práce Brillyho a Korhonen. Ve Finsku byla nejsušším obdobím 40. léta minulého století (Korhonen, 2007). Průměrné roční průtoky v letech 1941 a 1942 byly až 6x menší než průtoky v letech odtokově nadprůměrných. Nejméně srážek v Helsinkách ale bylo změřeno poměrně nedávno v roce 2006. Také Slovinsko bylo zasaženo extrémním suchem ve 40. letech 20. století (Brilly et al., 2007). Pro zmírnění následků byla na tocích postavena řada malých vodních nádrží, jejichž význam však od 50. let upadal, neboť vody bylo opět dost. Od 90. let však odtoky ve Slovinsku opět klesají, na Sávi dokonce už od 70. let. V Litvě (Kriauciuniene, Kovalenkoviene, Meilutyte-Barauskiene, 2007) byl nejsušším rokem 1963 a to jak z hlediska průměrného ročního průtoků tak i 30denního minimálního průtoků.

2.8.2 Předpovědi vývoje vodnosti v budoucnosti

Současné klimatické scénáře předpovídají nárůst teploty vzduchu prakticky ve všech zeměpisných šířkách. U predikcí srážek jednotný názor nepanuje a jednotlivé scénáře modelují předpovědi lišící se i u velkých povodí v řádech desítek procent. Odchytky a nejistoty globálních a regionálních modelů, jakož i problémy při různých metodách downscalingu popisuje například Murphy (2000).

Manabe et al. (2004) namodelovali změny odtoků u 25 velkých světových řek z různých klimatických pásů. Nárůst průtoků až o 20 % (ve srovnání s průtoky v předindustriálním období) předpovídají u arktických řek (Mackenzie a Ob) pro polovinu 21. století a další růst až o dalších 20 % ve vzdálenější budoucnosti. Řeky v tropickém a mírném pásu vykazují malé změny, a to jak kladné tak záporné. Nijssen et al. (2001) pro tyto pásy předpovídají spíše poklesy průtoků, nicméně autoři zdůrazňují velkou variabilitu výstupů z globálních klimatických modelů. Tato studie se zabývala také změnami odtoku v průběhu roku. Největší změny se očekávají v povodí řek mírných a vyšších zeměpisných šířek, na nichž v zimním období leží sněhová pokrývka. V souvislosti s nárůstem teploty vzduchu a zvýšením srážkových úhrnů jsou predikovány velké nárůsty průtoků v zimě a snížení jarních kulminací. V nejvyšších zeměpisných šířkách se budou zimní teploty udržovat pod bodem mrazu a větší množství sněhu uloženého v průběhu zimy se projeví na jaře zvýšením průtoků při tání.

Také v Evropě se podle klimatických scénářů očekává zvýšení teploty vzduchu na celém kontinentu. Na rozdíl od teploty je u srážek zvýšení očekáváno pouze v západní a severní Evropě a to především v zimě. Na východě a ve Středomoří by měly srážky ubývat a to hlavně v létě (viz např. Blenkinsop a Fowler, 2007). Studie modelující změnu odtoku v povodí španělské řeky Alcanadre předpokládá (podle IPCC scénáře A2) snížení průtoků v období 2070 - 2100 o 50 % oproti průměrnému průtoku období 1970 - 2000 (Samper, Álvarez, Vera, 2007). V Jordánsku dojde v důsledku očekávaného snížení srážkových úhrnů o 11 % a zvýšení teploty k omezení dostupnosti vody o 25 % (Menzel, Teichert, Weiss, 2007). Také v Řecku výstupy z hydrologických modelů předpovídají (v tomto případě pro rok 2050) poklesy průtoků a to prakticky po celý rok, nejvíce však v létě, a to až o několik desítek procent (Mimikou et al. 2000). Studie institutu ISPRA (Dankers et al., 2007) uvádí, že na Pyrenejském poloostrově, v Itálii a na Balkánském poloostrově by mohly průtoky okolo roku 2070 klesnout na pouhých 50 % současných průtoků.

Naopak více vody očekávají ve Skandinávii, v Pobaltí, na severu Ruska, na Islandu a částečně i v Británii, Francii a Beneluxu. V některých povodích Finska je předpovídán nárůst průtoků až o 50 % (EEA, 2004). V Dánsku modely udávají nárůst ročních srážkových úhrnů o 7 % (období 2071 - 2100 ve srovnání s průměrem 1961 - 1990) a vzrůst odtoku o 12 %.

V důsledku přerozdělení srážek v průběhu roku však i zde očekávají poklesy průtoků, a to v září a říjnu (Thodsen 2007). Analýzu vlivu klimatické změny na průtoky ve Velké Británii vypracovali Sefton a Boorman (1997). Výběr 39 stanic jim umožnil plošnou interpolaci výsledků, konkrétně změny dlouhodobého průměrného průtoky, percentilu Q95 a průměrného ročního maxima. Výsledkem je mapa s kladnými i zápornými trendy. Scénáře klimatické změny předpovídají nárůst roční výšky srážek na celém území Británie, ovšem vliv rostoucí teploty má efekt opačný. Nejmenší přírůstek srážek (10 %) a zároveň největší zvýšení teploty (až o 3.6 °C) se očekává v jihovýchodní Anglii. Směrem k severozápadu predikovaná změna srážek roste a zvýšení teploty se zmenšuje. Výsledkem je očekávaný pokles průtoků v centrální, jižní a východní Anglii a to až o 20 %. Naopak ve Walesu a severní Anglii by měl odtok narůst až o 60 %. Autoři upozorňují na fakt, že vlivem odlišného land-use a geologie povodí mohou odtoky kolísat daleko více než ukazují izolinie výsledných map.

Zvýšení průtoků v zimě a snížení v létě jsou nejčastěji předpovídané trendy pro toky v oblastech bohatých na sníh a led. Například Beniston et al. (1995) ve své studii varují před zvýšeným rizikem častějšího výskytu hydrologických extrémů v oblasti centrálních Alp. Ve srovnání s průměrem 1961 - 1990 předpověděli pro období 2071 - 2100 90% zvýšení zimního odtoku a 45% snížení odtoku letního. Průtoky na Rýně se zabývala Linde (2007). Pro léto a podzim očekává snížení průtoků a to až o 42 % v závislosti na použitém klimatickém scénáři. Naopak v zimě by měly průtoky mírně stoupat.

Pro německou spolkovou zemi Brandenbursko zpracoval podrobnou studii zabývající se vlivem klimatické změny na různé meteorologické a hydrologické veličiny Lahmer (2003). Pro změnu teploty vzduchu do roku 2050 použil dva klimatické scénáře. První předpokládal zvýšení teploty oproti normálu 1951 - 1990 o 1,5 °C, druhý o 3 °C. Výstupy studie byly procentuální změny srážek, potenciální a aktuální evapotranspirace, perkolace, povrchového a celkového odtoku za rok, letní a zimní období. Výsledky ukazují významnější snížení srážek a zvýšení evapotranspirace v zimním období. K nárůstu aktuální evapotranspirace vlivem vzrůstu teploty dojde jen v malé míře, a to kvůli celkovému vláhovému deficitu. Celkový odtok by se mohl snížit až o 50 %, z toho povrchový o 23 % a perkolace až o více než 60 %.

Pokles průtoků v povodí Labe předpovídá i studie Krysanové et al. (2008). Referenční období 1960 - 1990 srovnávala s namodelovanými odtoky pro období 2046 - 2055. Průměrné roční maximum i minimum by měly poklesnout, z toho daleko významněji minimum. Snížit by se mělo také doplňování zásob podzemních vod, a to o 37 %, a aktuální evapotranspirace o 4 %. Další projekt v povodí Labe se zabýval řekou Muldou, která pramení v Krušných horách a je jedním z jeho přítoků. Také v této práci výsledky ukazují na snížení srážkových úhrnů, zvýšení teploty vzduchu a následné snížení povrchového odtoku (Menzel a Bürger, 2002).

Ve studii Majerčákové et al. (2004) bylo vyhodnoceno přibližně 30 % území Slovenska jako velmi zranitelné z hlediska vodních zdrojů pod vlivem klimatické změny. Pokles ročních odtoků je výstupem práce Danihilika et al. (2004). Pro povodí horního Hronu indikují všechny scénáře modelu soustavný pokles ročního odtoku ve srovnání s obdobím 1951 - 1980. Pro rok 2030 změna činí 5 až 27 %, pro rok 2075 dokonce 13 až 45 %. Průtoky se budou měnit nepravidelně v různých částech roku. Snížení průtoků – a tedy častější výskyt hydrologického sucha – se očekává přibližně od dubna do září, zvýšení především od prosince do února. Podobné scénáře platí i pro jiná povodí Slovenska (viz např. Čunderlík, Hlavčová, Szolgay, 1998; Petrovič, 2000; Hlavčová et al., 2000). Kostka a Holko (2000) hodnotili kromě odtoku také změnu vodní hodnoty sněhu a délku trvání sněhové pokrývky, a to na modelovém povodí Jaloveckého potoka v Západních Tatrách. Průměrná denní vodní hodnota sněhu by podle modelu mohla kolem roku 2075 klesnout až na pouhou polovinu vzhledem k průměru 1989 - 1999. Délka trvání sněhové pokrývky by se v průměru měla zkrátit o měsíc.

2.8.3 Vliv změny klimatu na malé průtoky

Predikované změny odtoku se pochopitelně nedotknou pouze průměrných průtoků. Ovlivněny budou i průtoky malé. Kvantifikovat změny malých vod je ovšem velmi obtížné a výsledky jsou zatíženy velkou nejistotou. Navíc se na charakteru odtoku v období hydrologického sucha velmi významně podílí geologická stavba území.

Hirabayashi et al. (2008) zpracovali celosvětovou studii, ve které se mimo jiné věnovali vlivu klimatické změny na počet dnů s nízkým průtokem. Jako hranici nízkých průtoků zvolili kvantil Q90. Vypočetli hodnotu kvantilu pro 20. století a srovnávali ho s namodelovanou hodnotou pro období 2001 - 2030 a 2071 - 2100. Nárůsty počtu dnů s průtoky pod hodnotou kvantilu předpovídají pro velkou část severní a jižní Ameriky, centrální a jižní Afriku, Austrálii a oblast Středomořího moře. Naopak méně sucha modely udávají pro velkou část severního Ruska. K velmi podobným závěrům dospěli také Voss et al. (2002).

Předpovědi vývoje průměrných ročních sedmidenních minim v Evropě se zabývali Dankers et al. (2007). Z výsledků vyplývá, že by se změna minimálních průtoků měla do značné míry podobat vývoji průměrných průtoků, tj. minima by se měla snižovat na jihu Evropy (až o 40 %) a naopak zvyšovat na severu. Největší změny by se měly týkat horských toků, u kterých minima nastávají kvůli zámrazu v zimě: díky častějším srážkám ve formě deště by se měla výrazně zvýšit. Na tocích s letním výskytem minim by mělo dojít k jejich snížení prakticky v celé Evropě včetně ČR a to až o 40 %. Kromě snížení průtoků by mohl nastat problém i s přílišným zvýšením teploty vody. Také Lehner et al. (2006) vypracovali celoevropskou studii vlivu klimatické změny na hydrologické extrémy. Výstupy modelu WaterGap uvádí, že současné 100leté sucho se bude objevovat mnohem častěji v rozsáhlých oblastech jižní a jihovýchodní Evropy (od Portugalska po jih Ruska). Kolem roku 2070 se dnešní stoletá sucha mohou v těchto oblastech opakovat zhruba každých 40 let, v extrémních případech může být doba opakování i kolem 10 let. Část studie se zabývá nedostatkem vody, který vyvolají zvyšující se požadavky člověka na množství vody. Zatímco v západní Evropě by měla spotřeba vody zůstat přibližně stejná jako dnes, ve východní Evropě se předpokládá velký nárůst spotřeby díky rostoucí ekonomice. Z map vyplývá, že změny ve výskytech sucha v západní Evropě jsou převážně způsobeny klimatickou změnou, zatímco ve východní Evropě hraje významnou roli faktor antropogenní. V jihovýchodních Evropě je vlivem kombinace obou faktorů predikce nejpesimističtější. Na severovýchodě Evropy zvýšení spotřeby kompenzuje větší dostupnost vodních zdrojů. Blenkisop a Fowler (2007) modelovali změny suchých období v šesti povodích různých evropských řek. V závislosti na redistribuci srážek v průběhu roku upozorňují, že by se v některých povodích mohl snížit výskyt kratších such (trvajících maximálně 3 měsíce) na úkor delších (tří až šestiměsíčních).

Modelovou studii vlivu klimatické změny na povodně a sucha na belgické řece Dender vypracovali Vanneuville et al. (2007). Minimální průtoky by mohly kolem roku 2100 klesnout oproti současnosti až o 60 %, ovšem autoři upozorňují na velký rozptyl výsledků způsobený řadou nejistot. V sousedním Nizozemsku naznačují výstupy modelu SIMGRO snížení letních minim (konkrétně průtoků odpovídající percentilu Q95) pro rok 2050 pouze o 6 - 8 % (Querner, van Bakel, Mulder, 2007). Další belgická práce se zabývala reakcí povodí na změnu klimatu způsobenou zdvojnásobením koncentrace CO₂ (Gellens a Roulin, 1998). Hydrologické sucho bylo vymezeno současnou hodnotou 95. percentilu a tento práh byl zachován pro predikované odtoky. Některé scénáře předpovídají nárůst počtu suchých dnů, a to nejvíce v měsících, v kterých se již dnes nízké průtoky nejčastěji vyskytují (srpen až listopad). Jiné udávají naopak pokles sucha, neboť očekávají nižší vzestup teploty a větší vzrůst úhrnu srážek. Výsledky vykazují odlišnosti v závislosti na geologii povodí, a to konkrétně na kapacitě podzemních vod.

Roční minimální 30denní průtoky na litevských tocích zkoumali Kriauciuniene, Kovalenkoviene a Meilutyte-Barauskiene (2007). Minima se vyskytují převážně od června do srpna. Za období 1961 - 2003 nebyl na většině stanic zjištěn žádný trend, minima vzrostla signifikantně jen na několika stanicích na západě země. Kromě kvantitativních změn autoři zjistili také posun v nejčastějším časovém výskytu minim na litevských řekách: do roku 1960 byla zaznamenána nejčastěji v červnu, v novějším období v srpnu. Výrazná minima se vyskytují v cyklech s dobou opakování 27 let. Také pro skandinávské země je typické zvýšení ročních minim. Například Korhonen (2007) ho zaznamenal u 46 % vodoměrných stanic ve Finsku.

2.8.4 Vliv využívání půdy a její pokrývky na odtok

Ačkoliv hraje změna klimatu významnou úlohu při změně charakteru odtoku, je třeba vzít v úvahu také další faktory, které ovlivňují odtok vody z povodí. Je nepochybné, že změna využití krajiny ovlivňuje odtok velmi významně, někdy dokonce i více než změna klimatu. Typ vegetace ovlivňuje vlhkost a teplotu vzduchu, intercepci, potenciální evapotranspiraci, hloubku kořenové zóny. Těmito faktory je následně ovlivněna aktuální evapotranspirace a množství srážkové vody, která infiltruje nebo oteče přímo. Land-use a land-cover tak určují velikost povrchového a podzemního odtoku (Tallaksen, van Lanen ed., 2004).

Li a Mölders (2008) modelovali vliv zdvojnásobené koncentrace CO_2 a změny krajinného krytu na srážky, výpar a odtok čtyř velkých světových povodí (Yukon, Ob, St. Lawrence, Colorado). Při zvýšení koncentrace CO_2 dochází ke zpomalení koloběhu vody a zároveň ke zvýšení srážek a evapotranspirace. Stejně velké změny v oběhu vody, jako způsobí zdvojnásobení CO_2 , může zapříčinit také změna krajinného pokryvu. Závěry práce dále uvádí, že při zvýšení koncentrace CO_2 může hrát změna land-coveru ještě větší roli než za současných podmínek.

Zhang a Schilling (2006) prokázali souvislost rostoucího odtoku vody se změnou využití krajiny v povodí Mississippi. Přeměna přírodní krajiny na zemědělskou, ve které dominují řádkové plodiny jako sója, snížila evapotranspiraci, zvětšila doplňování zásob podzemní vody a zvýšila tím základní a povrchový odtok.

Práce popisující změnu krajinného pokryvu v jihozápadním Nigeru uvádí, že odlesnění území mělo na vodní bilanci zkoumané oblasti větší vliv než dlouholeté sucho, které se v této části Sahelu v druhé polovině 20. století vyskytlo (Leblanc et al., 2008).

Modelováním změny ročního odtoku v závislosti na stupni zalesnění povodí v Jihoafrické republice se zabýval také Pitman (1978). Při zvyšování zalesnění udává díky výrazně zvýšené intercepci a evapotranspiraci tropického lesa snížení odtoku až o desítky procent. Stejný efekt, ale s opačným průběhem byl zjištěn na řece Comet v Austrálii (Siriwardena et al., 2006). Po odlesnění povodí za účelem zisku pastvin a polí vzrostl odtok vody z povodí o 78 %. Tento dramatický nárůst lze částečně vysvětlit nárůstem srážkových úhrnů, nicméně změna využití krajiny měla rozhodující vliv.

Při studii založené na dlouhodobých pozorováních 23 povodí v západním Washingtonu zjistili Bowling a kol. (2000), že po odlesnění a následném poklesu evapotranspirace se letní minimální průtoky zvětšily. S těmito pracemi kontrastuje studie Guo et al. (2008). V hodnocení odtoku čínské řeky Xinjiang uvádí, že změna krajinného krytu neměla na roční hodnoty odtoku velký vliv. Výrazně však modifikovala křivku odtoku v průběhu roku. Zvýšení zalesnění území snižuje hydrologické extrémy: zvyšuje minima v období sucha a snižuje maxima v období velké vodnosti.

Velmi závažné jsou výsledky dlouhodobých pozorování (od roku 1954) na malých povodích Červík a Malá Rostoka v Beskydách. Clebek a kol. (2000) uvádí, že „ve vztahu k epizodě

ničení lesů znečišťovaným ovzduším a k porostním obnovám se ukazuje, že poloha křivek překročení m-denních průtoků vody v Beskydách se v letech 1957 až 1997 prokazatelně nezměnila“.

Stanovením průměrné roční výšky minimálního odtoku slovenských řek se zabývali Solín a Grešková (2000). Podobně jako Podlaha (2003) zjistili, že minima nejtěsněji korelují s průměrným ročním úhrnem srážek a nadmořskou výškou a nezávisí na orientaci svahů a land-use. Schneider (1965) poukázal v plošně malém, avšak geologicky rozmanitém území na velkou variabilitu nízkých průtoků. Doporučuje stanovit charakteristiky sucha bez využití geologických dat a základního odtoku jen v případě nutného rychlého odhadu.

Literatura

- Antal, E., Glantz, M. H. (1988) Identifying and Coping with Extreme Meteorological Events. Hungarian Meteorological Service. Budapest, 376 s.
- Beniston, M. et al. (1995) Simulation of climate trends over the Alpine regions. Development of a physically-based modelling system for application to regional studies of current and future climate. Final scientific report No. 4031-33250, Swiss National Science Foundation, Bern.
- Blenkinsop, S., Fowler, H. J. (2007) Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *International Journal of Climatology* 27, 1595-1610.
- Blinka, P. (2005) Klimatologické hodnocení sucha a suchých období na území České republiky v letech 1876–2002. *Meteorologické zprávy* 58(1), 10–18.
- Bowling, L. C., Storck, P., Lettenmaier D. P. (2000) Hydrologic effects of logging in western Washington, United States. *Water resources research*, vol. 36, No. 11, pages 3223-3240.
- Brázdil, R. (2002) Meteorologické extrémy a povodně v České republice - přirozený trend nebo následek globálního oteplování? *Geografie – Sborník ČGS* 107 (4), 349–370.
- Brilly, M. (2007) Climate change impact on mean annual river flows. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 82–87. Finnish Environment Institute, Helsinki.
- Brunetti et al. (2004) Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global and Planetary Change* 40, 141–149.
- Burn et al. (2004) An integrated approach to the estimation of streamflow drought quantiles. *Hydrological Sciences Journal* 49, 1011–1024.
- CAES [online 2006] Crop Moisture Index. College of Agricultural and Environmental Sciences, University of Georgia. interests.caes.uga.edu/drought/cmi.htm
- Conclusions from the International symposium on Time to adapt – climate change and European water dimension (2007), Berlin.
- Červený, J. et al. (1984) Podnebí a vodní režim ČSSR. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 414 s.
- Čunderlík, J., Hlavčová, K., Szolgay, J. (1998) Vplyv klimatickej zmeny na vnútroročné rozdelenie odtoku vo vybraných povodiach Slovenska. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 45 (2), 114–143.

- Danihilik, R. et al. (2004) Scenarios of the change in the mean annual and monthly runoff in the Hron Basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 52 (4), 291–302.
- Dankers, R. et al. (2007) Future changes in flood hazard in Europe. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 115–120. Finnish Environment Institute, Helsinki.
- Degirmendžic et al. (2004) Changes of Air Temperature and Precipitation in Poland in the Period 1951-2000 and Their Relationship to Atmospheric Circulation. *International Journal of Climatology* 24, 291–310.
- Desai, V. R., Mishra, A. K. (2006) Drought Forecasting Using Standardized Precipitation Index. *Jalvagian Sameeksha*, Indian National Committee on Hydrology, 21, 89–105.
- Doleželová, M. (2006) Projevy Severoatlantské oscilace v časové a prostorové variabilitě klimatu České republiky. Diplomová práce, Geografický ústav, PřF MU, Brno, 108 s.
- Domonkos, P. (2003) Recent Precipitation Trends in Hungary in the Context of Larger Scale Climatic Changes. *Natural Hazards* 29, 255–271.
- Druyan, L. M. (1988) Sea-surface temperature-Sahel drought teleconnections in GCM situations. In: *Recent Climatic Change - A Regional Approach* (ed. by S. Gregory), 154–165. Belhaven Press, London, 326 s.
- EEA (2004) Impact of Europe's changing climate. European Environment Agency, Copenhagen, 107 s.
- Engeland, K., Hisdal, H., Beldring, S., (2006) A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-model. *Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE)*, (34pp).
- Estrela, T. et al. (2001) Extreme hydrological events: floods and droughts. In: *Sustainable water in use in Europe*. European Environment Agency, Copenhagen, 84 s.
- Fiala, T. (2006) Vymezení období sucha a období převládající teploty vzduchu pomocí metody součtových řad na příkladu Vráže u Písku. *Meteorologické zprávy* 59 (3), 76–79.
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., Demuth, S. (2005) A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Science Discussions*, 2, 2427-2464.
- Fridrichová, R., Boháč, M. (2003) Vývoj metodik a zpracování charakteristik malých průtoků. *Výzkumná zpráva VÚV T.G.M.*, 37 s.
- Gibbs, W. J. et al. (1975) Drought. *Special Environmental Report No. 5*. WMO, Geneva, 113 s.
- Gregory, S. (1988) El Niño years and the spatial pattern of drought over India, 1901-70. In: *Recent Climatic Change - A Regional Approach* (ed. by S. Gregory), 226–236. Belhaven Press, London, 326 s.
- Gumbel, E. J. (1963) Statistical forecast of droughts. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* 8, 5–23.
- Guo, H. et al. (2008) Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology* 355, 106–122.
- Hayes, M. J. [online 2006] What is Drought? National Drought Mitigation Centre, Lincoln. www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm

- Henriques, A. G., Santos, M. J. J., (1999) Regional drought distribution model. *Physics and Chemistry of the earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, European Water Resources and Climate Change Processes, European Geophysical Society, vol. 24, no ½, pp. 19-22.
- Hirabayashi, Y. et al. (2008) Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *Hydrological Sciences Journal* 53, 754–772.
- Hisdal, H. et al. (2001) Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology* 21, 317–333.
- Hisdal, H. et al. (2007) Climate change signals in streamflow data in the Nordic and Baltic region. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 182–187. Finnish Environment Institute, Helsinki.
- Hisdal, H., Tallaksen, L. (2000) Drought Event Definition. *Technická zpráva č. 6 projektu ARIDE*, Oslo, Department of Geophysics, University of Oslo, 41 s.
- Hladný, J. et al. (1996) Dopady možné změny klimatu na hydrologii a vodní zdroje v České republice. *Národní klimatický program*, sv. 20, ČHMÚ, Praha, 138 s.
- Hlavčová et al. (2000) Modelovanie vplyvu zmeny klímy na režim odtoku v regióne stredného Slovenska. In: *Zväzok č. 9 Národného klimatického programu SR*, 15–38. MŽP SR a SHMÚ, Bratislava.
- Hounam, C. E. et al. (1975) Drought and Agriculture. *Technical Note No. 138*. WMO, Geneva, 127 s.
- Howell, W. R. ed. (1972) Drought Injury and Resistance in Crops. *Crop Science Society of America*, Madison, 88 s.
- Johanovský, Z., Wolf, P. et al. (1985) Hodnocení suchého období let 1982-4 v profilech vybraných nádrží ČSR. ČHMÚ, Praha, 36 s.
- Jónsdóttir, J. F., Uvo, C. B. (2007) Overview of the impacts of climate change on runoff in Iceland. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 221–226. Finnish Environment Institute, Helsinki.
- Kašpárek, L. (1989) Metody zpracování M-denních průtoků z víceletého pozorování. *Vodohospodářský časopis* 37(2), 154–172.
- Kašpárek, L. (1998) Dlouhodobé kolísání odtoku v povodí Labe a jeho vztah k výskytu hydrologického sucha. *Výzkumná zpráva VÚV T.G.M.*, 25 s.
- Kašpárek, L. (1998) Regional study on impact of climate change on hydrological conditions in the Czech Republic. *VÚV T.G.M.*, Praha, 69 s.
- Kašpárek, L., Fridrichová, R., Boháč, M. (2002) Vývoj metodik a zpracování charakteristik malých průtoků odpovídajících standardům zemí EU. *Výzkumná zpráva VÚV T.G.M.*, 72 s.
- Kašpárek, L., Novický, O. (1996) Regionální studie nedostatkových objemů v dílčích částech povodí Labe v období 1932-1990. *Zpráva úkolu Spolupráce na mezinárodním projektu FRIEND*, VÚV T.G.M., Praha.
- Kašpárek, L., Novický, O. (2000) Hydrological Drought studies in the context of long-term climate changes. *Příloha zprávy Spolupráce na mezinárodním projektu FRIEND*, výzkumná zpráva VÚV T.G.M., 31 s.

- Kašpárek, L., Novický, O. (2000) Analýza hydrologického sucha v povodí Metuje a Orlice. In: Workshop 2000 – Extrémní hydrologické jevy v povodích, 81–94. ČVTS, Praha.
- Kašpárek, L., Novický, O. (2001) Analýza nedostatkových objemů v povodí horního Labe. In: Workshop 2001 – Extrémní hydrologické jevy v povodích, 91–102. ČVUT Fakulta stavební, Praha.
- Kašpárek, L., Novický, O. (1997) Application of a physically-based model to identify factors causing hydrological drought in western and central European basins. In: Friend '97 – Regional hydrology: Concepts and models for sustainable water resources management, 197–204. IAHS publ. 246, Postojna.
- Kašpárek, L., Novický, O. (2002) Hydrological Drought Studies in Wide Context of Climate Variability. In: FRIEND 2002: Bridging the Gap between Research and Practice. Cape Town.
- Kašpárek, L., Novický, O. (1999) Současný stav hodnocení metod hydrologického sucha. In: Workshop 99 – Extrémní hydrologické jevy v povodích. ČVTS, Praha.
- Kašpárek, L., Novický, O., Polcar, P. (1988) Zpracování N-letých minimálních průtoků. Sborník prací 33, ČHMÚ, Praha.
- Kemp, D. D. (1990) Global Environmental Issues. A Climatological Approach. Routledge, New York, 220 s.
- Klavins, M., Rodinov, V. (2007) Long term changes of hydrological processes in inland waters of Latvia. In: Proceedings of the Third international conference on climate and water (ed. by M. Heinonen), 239–244. Finnish Environment Institute, Helsinki. Proceedings of the Third international conference on climate and water.
- Kopečná, L. (2002) Klimatický režim sucha v Praze. Diplomová práce, Katedra fyzické geografie a geoekologie, PřF UK, Praha, 74 s.
- Korhonen, J. (2007) Long-term discharge trends in Finland. In: Proceedings of the Third international conference on climate and water (ed. by M. Heinonen), 245–250. Finnish Environment Institute, Helsinki. Proceedings of the Third international conference on climate and water.
- Kostka, Z., Holko, L. (2000) Vplyv klimatickej zmeny na priebeh odtoku v malom horskom povodí. In: Zväzok č. 8 Národného klimatického programu SR, 91–109. MŽP SR a SHMÚ, Bratislava.
- Kriauciuniene, J., Kovanekoviene, M., Meilutyte-Barauskiene, D. (2007) Changes of the dry period runoff in Lithuania. In: Proceedings of the Third international conference on climate and water (ed. by M. Heinonen), 260–265. Finnish Environment Institute, Helsinki. Proceedings of the Third international conference on climate and water.
- Krysanova, V., Vetter, T., Hatterman, F. (2008) Detection of change in drought frequency in the Elbe basin: comparison of three methods. Hydrological Sciences Journal 53(3), 519–537.
- Kulasová B. (1993) Projekt Labe. Hydrologické podklady. ČHMÚ, Praha.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2004) Low flow estimates from short stream flow records – a comparison of methods. Journal of Hydrology, 1-23.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2007) A National low flow estimation procedure for Austria. Hydrological Sciences Journal, 52 (4), 611-624.

- Lahmer, W. (2003) Trend analyses of percolation in the state of Brandenburg and possible impacts of climate change. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 51 (3), 196–209.
- Lana, X., Martínez, M. D., Burgueño, A., Serra, C. (2008) Return period maps of dry spells for Catalonia (northeastern Spain) based on the Weibull distribution. *Hydrological Sciences Journal* 53 (1).
- Leblanc, M. J. et al. (2008) Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change* 61, 135–150.
- Lehner, B. et al. (2006) Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental integrated analysis. *Climate change* 75, 273–299.
- Li, Z., Mölders, N. (2008) Interaction of impacts of doubling CO₂ and changing regional land-cover on evaporation, precipitation, and runoff at global and regional scales. *International Journal of Climatology*, in press.
- Linde, A. H. (2007) Effects of climate change on discharge behaviour of the river Rhine. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 296–301. Finnish Environment Institute, Helsinki. *Proceedings of the Third international conference on climate and water*.
- Majerčáková, O. et al. (1997) The variability of hydrological series due to extreme climatic conditions and the possible change of the hydrological characteristics with respect to potential climate change. In: *FRIEND '97 - Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management* (ed. by A. Gustard), 59–66. IAHS Publ. 246.
- Majerčáková, O. et al. (2004) Vývoj zložiek hydrologickej bilancie za obdobia 1931–1980 a 1961–2000. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 52 (4), 355–364.
- Manabe et al. (2004) Simulated long-term changes in river discharge and soil moisture due to global warming. *Hydrological Sciences Journal* 49 (4), 625–642.
- Martín-Rosales, W., Pulido-Bosch, A., Vallejos, Á., Gisbert, J., Andreu, J. M., Sánchez-Martos, F. (2007) Hydrological implications of desertification in southeastern Spain. *Hydrological Sciences Journal*, Special Section: Dryland Hydrology in Mediterranean Regions, 52(6).
- Meddi, M., Talia, A. (2007) Study of the daily pluviometry in the North of Algeria. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 314–319. Finnish Environment Institute, Helsinki. *Proceedings of the Third international conference on climate and water*.
- Menzel, L., Bürger, G. (2002) Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology* 267, 53–64.
- Menzel, L., Teichert, E., Weiss, M. (2007) Climate change impact on the water resources of the semi-arid Jordan region. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 320–325. Finnish Environment Institute, Helsinki. *Proceedings of the Third international conference on climate and water*.
- Mikláněk, P. et al. (2007) Regionalisation of Slovak rivers with respect to climate change in 1930–2005 and their sensitivity to QBO and NAO phenomena. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 326–331. Finnish Environment Institute, Helsinki. *Proceedings of the Third international conference on climate and water*.

- Mimikou et al. (2000) Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *Journal of Hydrology* 234, 95–109.
- Monacelli, G. et al. (2005) Drought Assessment and Forecasting. WMO, Working group on Hydrology, Regional Association VI (Europe), Průhonice, 100 s.
- Murphy, J. (2000) Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques. *International Journal of Climatology* 20, 489–501.
- NDMC [online 2004] Spotting Drought Before It's Too Late. National Drought Mitigation Centre, Lincoln. www.drought.unl.edu/pubs/spotdrt.pdf
- NDMC [online 2006] The Standardized Precipitation Index. National Drought Mitigation Centre, Lincoln. www.drought.unl.edu/monitor/spi.htm
- Nijssen, B. et al. (2001) Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climatic Change*, 50, str. 143–175.
- Ogallal, J. L., Gbeckor-Kove, N. (1989) Drought and Desertification. WMO, Geneva, 73 s.
- Palmer, W. C. (1965) Meteorological Drought. U.S. Department of Commerce, Research paper No. 45, 58 s.
- Perry, A. H. (1988) Trends in Maltese rainfall: causes and consequences. In: *Recent Climatic Change - A Regional Approach* (ed. by S. Gregory), 125–129. Belhaven Press, London.
- Petrovič, P. (2000) Dôsledky klimatickej zmeny na hydrologický režim v povodí Nitry. In: *Zväzok č. 9 Národného klimatického programu SR*, 58–73. MŽP SR a SHMÚ, Bratislava.
- Piccarreta M. et al. (2004) Trend Analysis of Precipitation and Drought in Basilicata from 1923 to 2000 within a Southern Italy Context. *International Journal of Climatology* 24, 907–922.
- Pielke, R. A. (2005) Drought 2002 in Colorado: An unprecedented drought or a routine drought? *Pure and Applied Geophysics* 162 (8–9), 1455–1479.
- Pitman, W. V. (1978) Trends in Streamflow due to Upstream Land-use Changes. *Journal of Hydrology* 39, 227–237.
- Podlaha, A. (2003) Vliv geografických faktorů na režim minimálního odtoku v povodích České republiky. *Magisterská práce*, Praha, 158 s.
- Querner, E. P., Van Bakel, P. J. T., Mulder, H. M. (2007) Water management innovation for meeting climate change effects and European Water Framework Directive targets: Pilot study Lankheet. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 379–384. Finnish Environment Institute, Helsinki. *Proceedings of the Third international conference on climate and water*.
- Querner, E. P., Van Lanen, H. A. J., Tallaksen, L. M., Kašpárek, L. (1997) Impact of land use, climate change and groundwater abstraction on streamflow droughts, using physically-based models. In: *Friend '97 – Regional hydrology: Concepts and models for sustainable water resources management*, 171–179. IAHS publ. 246, Postojna.
- Rao, G. A. (1987) Drought Probability Maps. *Agricultural Meteorology*, CAgM Report No. 24, WMO, Geneva.
- Reihan, A., Loigu, E. (2007) Recent trends in water discharges of Estonian rivers. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M.

- Heinonen), 385–391. Finnish Environment Institute, Helsinki. Proceedings of the Third international conference on climate and water.
- Ridolfi, L., D'Odorico, P., Porporato, A., Rodriguez-Iturbe, I. (2000) Duration and frequency of water stress in vegetation: An analytical model. *Water resources research*, vol. 36, No. 8, pages 2297-2307.
- Roald, L. A., Hisdal, H., Beldring, S. (2007) Floods and droughts in a changing climate in Norway. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 392–397. Finnish Environment Institute, Helsinki. Proceedings of the Third international conference on climate and water.
- Řiřica, J., Novický, O. (1995) Experiments with deficit volumes (EXDEV). Description of the program. ČHMÚ, Praha, 7 s.
- Řiřicová, P. et al. (2003) Sucho v českých povodích v roce 2003 a v minulých desetiletích. In: *Sborník příspěvků k Workshopu 2003*, 103–112. ČVUT, Praha.
- Samper, J., Álvares, D., Vera, M. A. G. (2007) Evaluation of the impact of climatic change on water resources of Alcanadre basin, Ebre river, using hydrologic models and GIS. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 602. Finnish Environment Institute, Helsinki. Proceedings of the Third international conference on climate and water.
- Santos, M. J., Henriques, A. G. (1999) Characterisation of meteorological drought in Mozambique. *International Conference on Integrated Drought Management – Lessons for Sub-Saharan Africa* Pretoria, 1-10.
- Sefton, C. E. M., Boorman, D. B. (1997) A regional investigation of climate change impacts on UK streamflows. *Journal of Hydrology* 195, 26–44.
- Schneider, W. J. (1965) Areal Variability of Low Flows in a Basin of Diverse Geologic Units. In: Riggs, H., C. et al. (1980) Characteristics of Low Flows. *Journal of the Hydraulics Division* 106(5), 717–731.
- Siriwardena, L. et al. (2006) The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology* 326, 199–214.
- Sládek, I. (1989) Wind Statistics. In: *WMO - ETH International Workshop on Precipitation Measurement*, St. Moritz.
- Sládek, I. (2001) Spells of Drought: Climatological Treatment. *AUC Geographica* 36(2), 147–153.
- Solín, L., Grešková, A. (2000) Hydrogeografické regionálne typy dlhodobého priemerného ročného minimálneho odtoku na území Slovenska. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 48(6), 399–432.
- Stehlík, M. (1996) Určování rizika výskytu sucha pro potřeby zemědělství. Diplomová práce, Katedra fyzické geografie a geoekologie, PřF UK, Praha, 88 s.
- Subrahmanyam, V. P. (1967) Incidence and Spread of Continental Drought. WMO, Geneva, 52 s.
- Tallaksen, L. M., Van Lanen, H. A. J. (2004) Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Elsevier, Amsterdam, 579 s.

- Thodsen, H. (2007) The influence of climate change on stream flow in Danish rivers. *Journal of Hydrology* 333, 226–238.
- Todorovic, M. (2007) Monthly climatic water balance of the Apulia region (Southern Italy): analysis of historical weather data and projections for the 21st century. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 463–469. Finnish Environment Institute, Helsinki.
- USFS [online 2007] Wildland Fire Assessment System. <http://www.wfas.net>
- Van Lanen, H. A. J., Tallaksen, L. M., Kašpárek, L., Querner, E. P. (1997) Hydrological drought analysis in the Hupsel basin using different physically-based models. In: *Friend '97 – Regional hydrology: Concepts and models for sustainable water resources management*, 189–196. IAHS publ. 246, Postojna.
- Vanneuville, W. K. et al. (2007) Impact of climate change on high and low discharge on Flemish rivers. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 494–499. Finnish Environment Institute, Helsinki. *Proceedings of the Third international conference on climate and water*.
- Venäläinen, A., Vajda, A., Saku, S. et al. (2007) Drought and extreme precipitation in Finland. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 512–517. Finnish Environment Institute, Helsinki. *Proceedings of the Third international conference on climate and water*.
- Vorel, Č. (1937) Sucha na území Československé republiky v posledních desetiletích. *Práce a studie, sešit 22. Státní ústavy hydrologický a hydrotechnický T. G. Masaryka*, 14 s.
- Voss, R. et al. (2002) Enhanced resolution modelling study on anthropogenic climate change: changes in extremes of the hydrological cycle. *International Journal of Climatology* 22, 755–777.
- Weissová, J. (2000) Hodnocení období sucha v letech 1921–1999 podle naměřených hodnot meteorologických prvků na stanici Praha-Karlov. Diplomová práce, Katedra fyzické geografie a geoekologie, PřF UK, Praha, 66 s.
- Wilhite, D. A. (2000) *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management*. WMO, Geneva, 185 s.
- Yu P. S., C. C. Kuo, C. Y. Lin, S. T. Chen (2007) Investigation on variation of drought characteristics in Southern Taiwan. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water* (ed. by M. Heinonen), 550–555. Finnish Environment Institute, Helsinki. *Proceedings of the Third international conference on climate and water*.
- Zhang, Y. K., Schilling, K. E. (2006) Increasing streamflow and baseflow in Mississippi Rivers since the 1940 s: Effect of land use change. *Journal of Hydrology* 324, 412–422.

Článek 2

FIALA, T. (2006): Hydrologické charakteristiky řad průměrných denních průtoků na českých tocích – výběr nového období a srovnání s dosud používaným obdobím 1931–80. In: Zborník príspevkov z 18. konference mladých hydrológov. SHMÚ, Bratislava, ISBN 80-88907-56-X, 9 s.

HYDROLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY ŘAD PRŮMĚRNÝCH DENNÍCH PRŮTOKŮ NA ČESKÝCH TOCÍCH – VÝBĚR NOVÉHO OBDOBÍ A SROVNÁNÍ S DOSUD POUŽÍVANÝM OBDOBÍM 1931-80

Theodor Fiala

Anotace: V posledních měsících se oddělení povrchových vod ČHMÚ zabývalo výběrem období pro výpočet nových hydrologických charakteristik M-denních průtoků. Uvažována byla čtyřicetiletí 1961-2000 a 1966-2005, nakonec však bylo přijato období 1961-2005. Na datech z 50 vodoměrných stanic, které měly nepřerušené řady pozorování, bylo provedeno první srovnání statistických charakteristik období 1931-1980 (doposud používané) a 1961-2005.

Klíčová slova: hydrologie, M-denní průtok, statistika, referenční období

Theodor Fiala: THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MEAN DAILY DISCHARGE SERIES ON CZECH STREAMS - CHOICE OF A NEW PERIOD AND COMPARISON WITH THE PERIOD 1931-1980

Annotation: Recently, the Department of Surface Waters of the Czech Hydrometeorological Institute has dealt with choosing a new period for the evaluation of hydrological characteristics. Two forty-year long periods were considered (1961-2000 and 1966-2005), however period 1961-2005 was finally accepted. First brief comparison of the 1931-1980 and 1961-2005 period was carried out using the data from 50 gauging station that had continuous gauging series.

Key words: hydrology, M-day discharge, statistics, reference period

1. Úvod

Oddělení povrchových vod Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) se v rámci své činnosti mimo jiné zabývá sekundárním zpracováním hydrologických dat. Do sekundárního zpracování patří také odvození základních hydrologických charakteristik, tj. M-denní a N-leté průtoky. Tyto charakteristiky jsou významnou součástí odborných hydrologických posudků a studií, které slouží jako podklad pro výstavbu a provoz vodohospodářských objektů a zařízení, protipovodňovou ochranu, vyhodnocování povodní apod.

Prvním významným dílem zpracovávajícím hydrologické charakteristiky byly třídní Hydrologické poměry ČSSR. Kolektiv autorů Hydrologické služby HMÚ v nich zhodnotil třicetileté období 1931-1960. O dvacet let později převažoval mezi odborníky názor, že pro odvození N-letých průtoků je nejlepší využít co nejdelší výchozí období a pro odvození M-denních průtoků je třeba zvolit nové reprezentativní období. Proto byly v osmdesátých letech zpracovány charakteristiky za období 1931-1980, které jsou v posudkové činnosti ČHMÚ používány dodnes.

V devadesátých letech 20. století se však objevily hydrologické studie, které poopravily názor na vhodnost využívání co nejdelších řad pro výpočet M-denních průtoků. Byly zjištěny změny v hydrologických řadách některých slovenských řek, které vyvolaly potřebu hydrologických a klimatologických studií. V roce 1991 se na Slovensku konal seminář Možnosti vplyvu klimatických zmien na hydrologický režim, v České republice Výzkumný ústav vodohospodářský TGM (VÚV) řešil úkol č. 1043/210, který se přímo jmenoval „Metody výpočtu hydrologických dat v měnících se podmínkách“. Výsledky hydrologických studií byly následující:

- Co nejdelší řady pozorování jsou vhodné, pokud obecně popisujeme hydrologický režim nějakého území. V dlouhých řadách se také s větší pravděpodobností vyskytnou extrémní

hodnoty, které využijeme při stanovování návrhových veličin, jako jsou například N-leté maximální a minimální průtoky.

- Pokud poskytujeme podklady pro návrh, nebo posuzujeme aktivity související s hydrologickými jevy v budoucnosti, potřebujeme předpověď budoucího vývoje. Dosud užívaný postup využívající pro předpověď co nejdelší hydrologické řady pozorování ignoruje dlouhodobé kolísání klimatu a vliv člověka a jimi vyvolané kolísání hydrologických charakteristik.
- Považují-li se řady průměrných průtoků za stacionární, nedoporučuje se při výpočtu průtokových charakteristik prodloužovat období nad 50 let. Vhodnější je omezit délku řady na 40-50 let a charakteristiky každých 10 nebo 20 let aktualizovat [1].

2. Výběr nového období v České republice a na Slovensku

Na konci devadesátých let tedy bylo zřejmé, že při zpracování nových hydrologických charakteristik průměrných průtoků nebude uvažována možnost prodloužení referenčního období na sedmdesátiletou řadu (1931-2000).

Hydrologové Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) při výběru nového období vycházeli nejen z výše uvedených vědeckých poznatků, nýbrž i ze skutečnosti, že se za poslední čtyři dekády rozvinula a stabilizovala staniční síť SHMÚ. Proto bylo na Slovensku rozhodnuto, že budou nové hydrologické charakteristiky zpracovány za období 1961-2000 [2]. Zpracování úkolu bylo dokončeno v roce 2005.

Odvozováním charakteristik průměrných průtoků se odborníci z ČHMÚ a VÚV začali zabývat až v roce 2006, kdy bylo rozhodnuto o výběru nového období. Důvodem, proč rozhodnutí padlo později než na Slovensku, jsou především extrémní meteorologické a hydrologické situace, které se na území ČR na konci 20. a na začátku 21. století vyskytly. Příkladem jsou povodně v roce 1997 a 2002, jejichž vyhodnocení, následné přehodnocení N-letých průtoků a odvození charakteristik povodňových vln zaměstnalo ČHMÚ a VÚV na řadu měsíců. Aktuálními problémy byl výběr nového období pro odvození průměrných průtoků odsouván do pozadí. V posledních několika letech se však stupňoval požadavek poboček ČHMÚ na výpočet nových hydrologických charakteristik. Zkušenosti z kontaktu s odběrateli poskytovaných dat ukazují, že i oni již data za období 1931-80 začínají považovat za zastaralá a požadují hodnoty zohledňující novější období.

Podobně jako na Slovensku, také v České republice hydrologové refletovali studie doporučující vybrat období dlouhé 40 až 50 let. Nejprve bylo navrženo ke zvážení období 1961-2000, tedy shodné se slovenským, a dále jiné čtyřicetileté období 1966-2005.

3. Statistické srovnání období 1961-2000 a 1966-2005

Obě navrhovaná období mají své výhody a nevýhody. Výhodou úseku 1961-2000 je bezpochyby fakt, že by zpracované charakteristiky bylo možné velmi dobře srovnávat se slovenskými údaji vypočítanými v SHMÚ. Drobnou „estetickou“ výhodou je také zaokrouhlenost období na celá desetiletí.

Velkou nevýhodou a zároveň důvodem, proč bylo navrženo období 1966-2005, je skutečnost, že vypočtení charakteristik z časového úseku končícího rokem 2000 v sobě neobsahuje hydrologicky významná období, která se v posledních letech vyskytla.

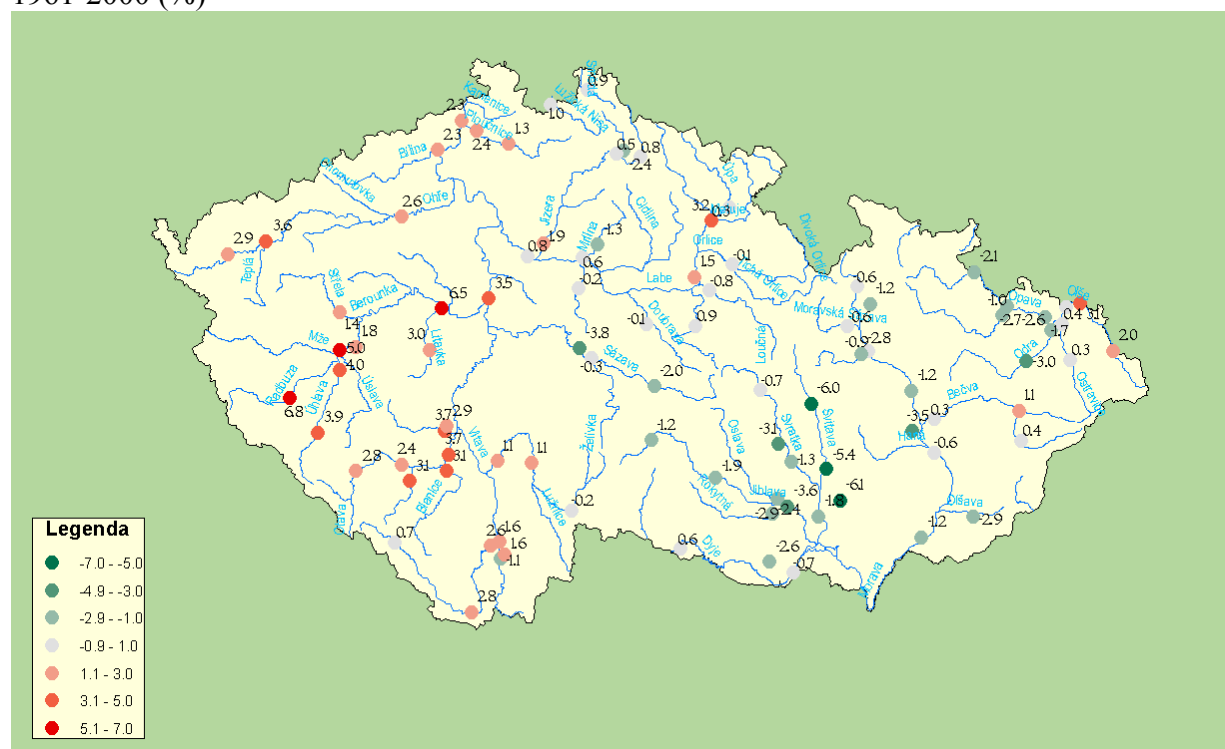
Pro výběr pozdějšího období tedy mluví fakt, že zahrnuje i extrémně vodný rok 2002 a následně velmi suchý rok 2003. Lze předpokládat, že se tyto roky významně projeví v některých hydrologických charakteristikách, například v hodnotách M-denních průtoků.

Statistické srovnání výše zmíněných dvou období bylo provedeno na datech získaných z vodoměrných stanic, které měly za období 1961-2005 nepřerušené řady průměrných denních průtoků. Ze sítě vodoměrných stanic ČHMÚ tomuto požadavku vyhovělo 89 stanic. Přidány byly navíc čtyři stanice, jejichž přemístění v uvedeném období bylo statisticky nevýznamné. Příkladem je stanice Tuřice na řece Jizeře měřící do roku 1999 a od roku 2000 navazující stanice Tuřice-Předměřice. Dohromady tedy bylo využito dat z 93 vodoměrných stanic.

Statistické zpracování bylo provedeno v programu CTPA (Change and Trend Problem Analysis), který byl naprogramován pro potřeby hydrologů ČHMÚ. Tento program umožňuje získat základní statistické ukazatele datové řady (průměr, směrodatná odchylka, koeficient variace, histogram), nabízí testy normality (např. test šikmosti, Kolmogorov-Smirnov test, sdružený test) a dále obsahuje statistické testy, které mimo jiné umožňují zkoumat změnu střední hodnoty řady, testovat trendy apod.

Jako první bylo provedeno srovnání dlouhodobých průměrných průtoků $Q_{1961-2000}$ a $Q_{1966-2005}$. Na obr. 1 je znázorněn procentuální rozdíl dlouhodobého průměru novějšího období (tj. 1966-2005) oproti staršímu (1961-2000). Rozdíly v dlouhodobých průtocích se pohybují od -6.1% (stanice Rychmanov na Cezavě, jižní Morava) po $+6.8\%$ (stanice Staňkov na Radbuze, západní Čechy). Celkově se velikost průtoku příliš nezměnila; průměrně vzrostl o 0.3% .

Obr. 1: Změny průměrných průtoků vybraných stanic, období 1966-2005 oproti období 1961-2000 (%)

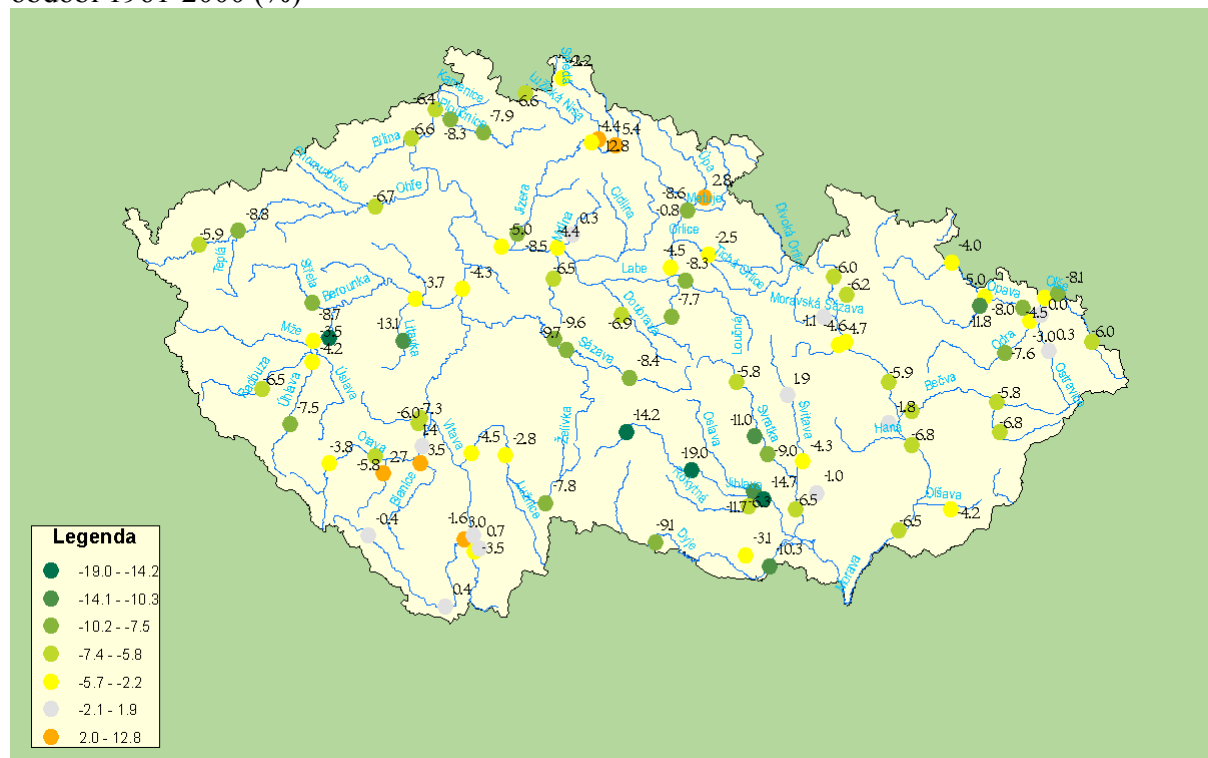


Z mapy jsou dobře patrné prostorové rozdíly ve změnách průměrných průtoků. Většina toků v povodí Labe vykázala zvětšení, případně stagnaci průtoků. Naopak na Moravě došlo ke zmenšení s několika málo výjimkami (např. stanice na řece Olši). Tento rozdíl je patrně projevem povodňových průtoků, které se v roce 2002 vyskytly právě v povodí Labe.

Po analýze dlouhodobých průměrných průtoků bylo provedeno srovnání koeficientů variace průměrných ročních průtoků. Procentuální změny koeficientů jsou zobrazeny v mapě na obr. 2. Ačkoliv velmi vodný rok 2002 a suchý rok 2003 opravňovaly k domněnce, že se koeficient variace za období 1966-2005 oproti období 1961-2000 zvýší, došlo k tomu pouze

na 12 stanicích z 93 (nejvíce o +12.8 % na stanici Bohuňovsko-Jesenný na Kamenici). V 87 % případů tak došlo ke snížení variace (nejvíce o 19 % na stanici Ptáčov na Jihlavě), přičemž průměrná změna spočítaná ze všech 93 stanic činí -5.3 %.

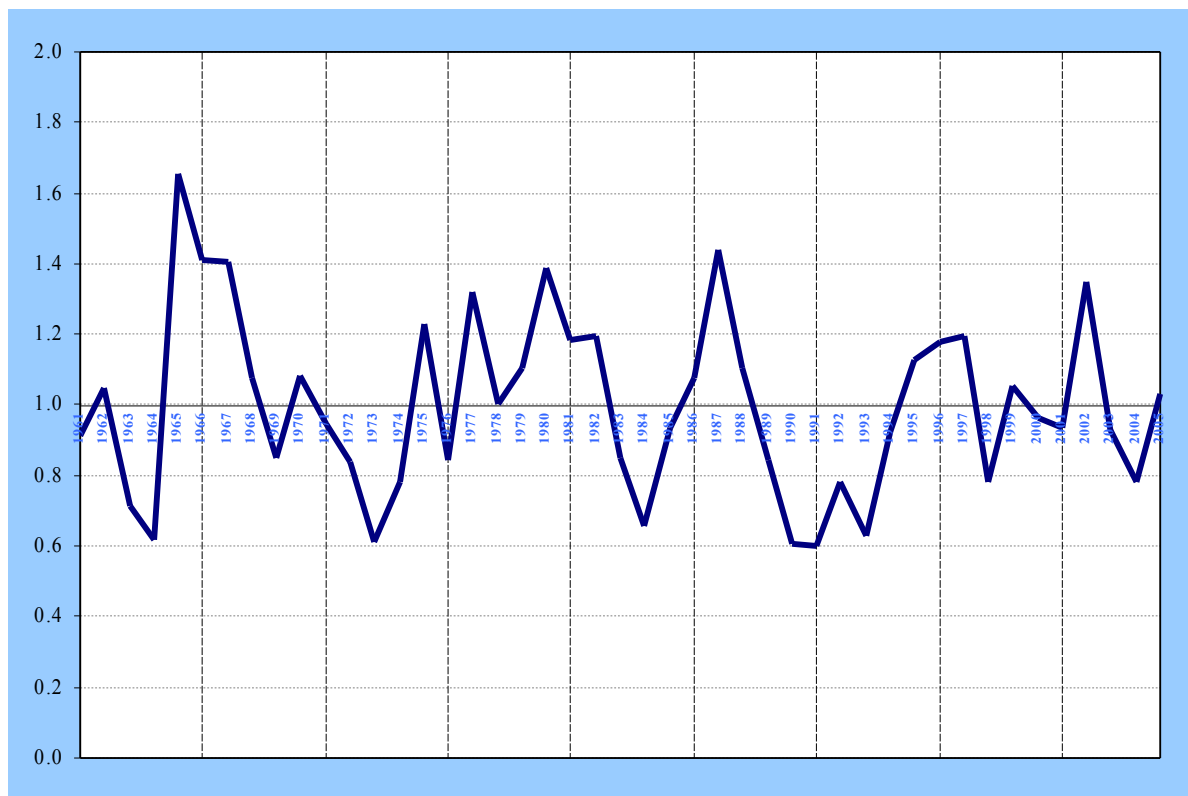
Obr. 2: Změna koeficientu variace průměrných ročních průtoků období 1966-2005 oproti období 1961-2000 (%)



Výsledky změn koeficientu variace naznačovaly, že první polovina šedesátých let byla z hlediska průtoků ještě rozkolísanější než začátek 21. století. Aby byla tato hypotéza potvrzena, bylo nutné spojit obě zkoumaná čtyřicetiletí do jediného období 1961-2005, pro které byly vypočteny statistické charakteristiky každé stanice. Byly vypočteny procentuální podíly každého průměrného ročního průtoku na dlouhodobém průměru 1961-2005 u každé stanice. Tyto procentuální podíly byly následně zprůměrovány přes jednotlivé roky, tj. z 93 hodnot získaných za rok 1961 byl zjištěn průměr. Tento průměr byl vzat jako „celorepubliková“ charakteristika vyjadřující procentuální podíl odtoku daného roku na dlouhodobém průměru, neboť přesná čísla o celkovém ročním odtoku z území České republiky nejsou k dispozici, respektive nejsou vypočtena (viz graf na obr. 3).

Z grafu je patrný nadprůměrně vodný rok 2002 a následné suché roky 2003 a 2004. Nicméně první polovina šedesátých let byla rozkolísaná ještě více. Vyskytly se jak velmi málo vodné roky 1963 a 1964, tak extrémně vodný rok 1965. Díky absenci těchto roků v období 1966-2005 není divu, že se koeficient variace na většině tocích snížil.

Obr. 3: Roční podíly na dlouhodobém průměrném průtoku období 1961-2005 ($Q_a = 1$)



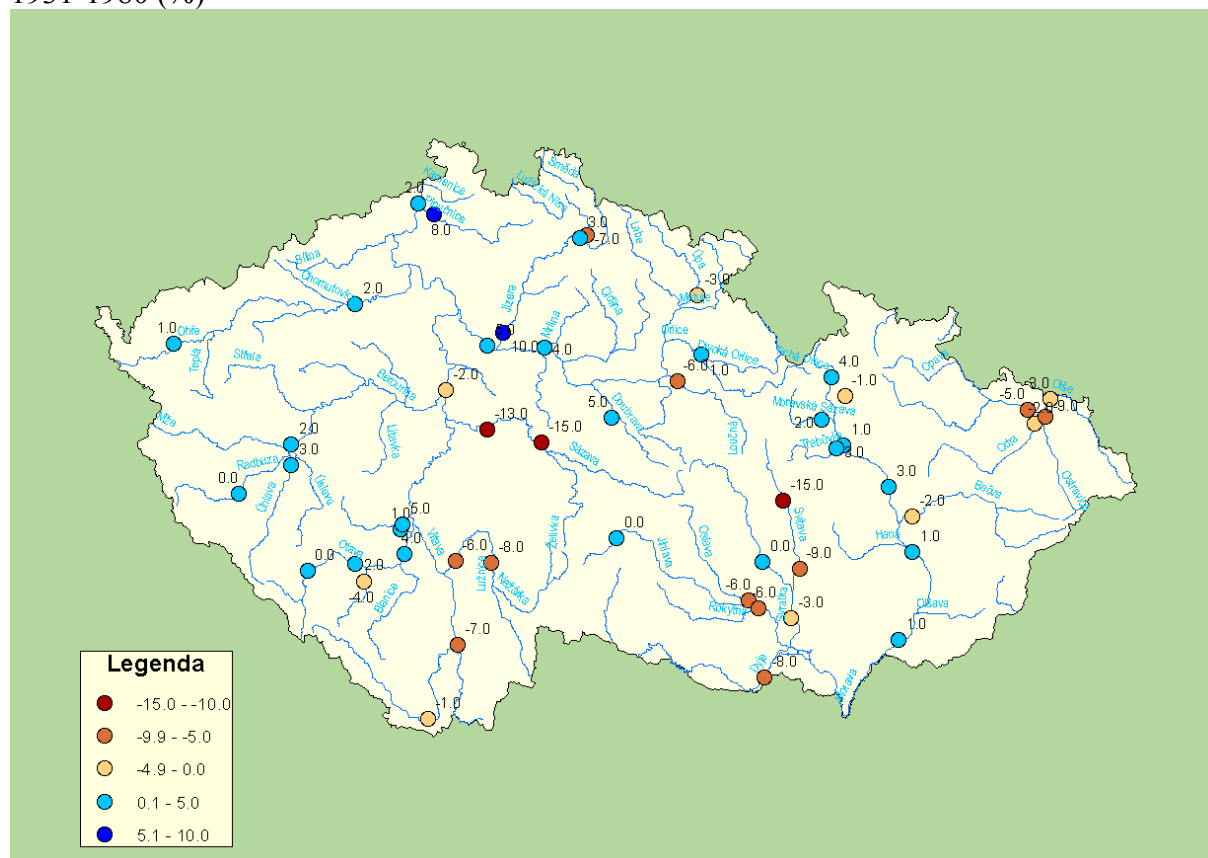
Pokud jsme při výběru období pro zpracování nových hydrologických charakteristik nechtěli opominout „zajímavé“ roky posledních pěti let, bylo by nesprávné přehlédnout začátek šedesátých let. **Proto bylo rozhodnuto, že odvození nových hydrologických charakteristik bude provedeno za období 1961-2005.**

4. Srovnání vybraných charakteristik období 1961-2005 s obdobím 1931-1980

Zpracování nových hydrologických charakteristik z řad průměrných průtoků za období 1961-2005 je v současnosti na úplném počátku. Také srovnávání dosud používaného (1931-1980) a nově stanoveného období se teprve rozbíhá, první přiblížení přináší tato práce. Pro srovnání statistických charakteristik byly prozatím vybrány takové vodoměrné stanice, které měly po celou dobu (tj. od r. 1931 do r. 2005) nepřerušenou řadu průměrných denních průtoků. Takových stanic eviduje ČHMÚ přesně padesát.

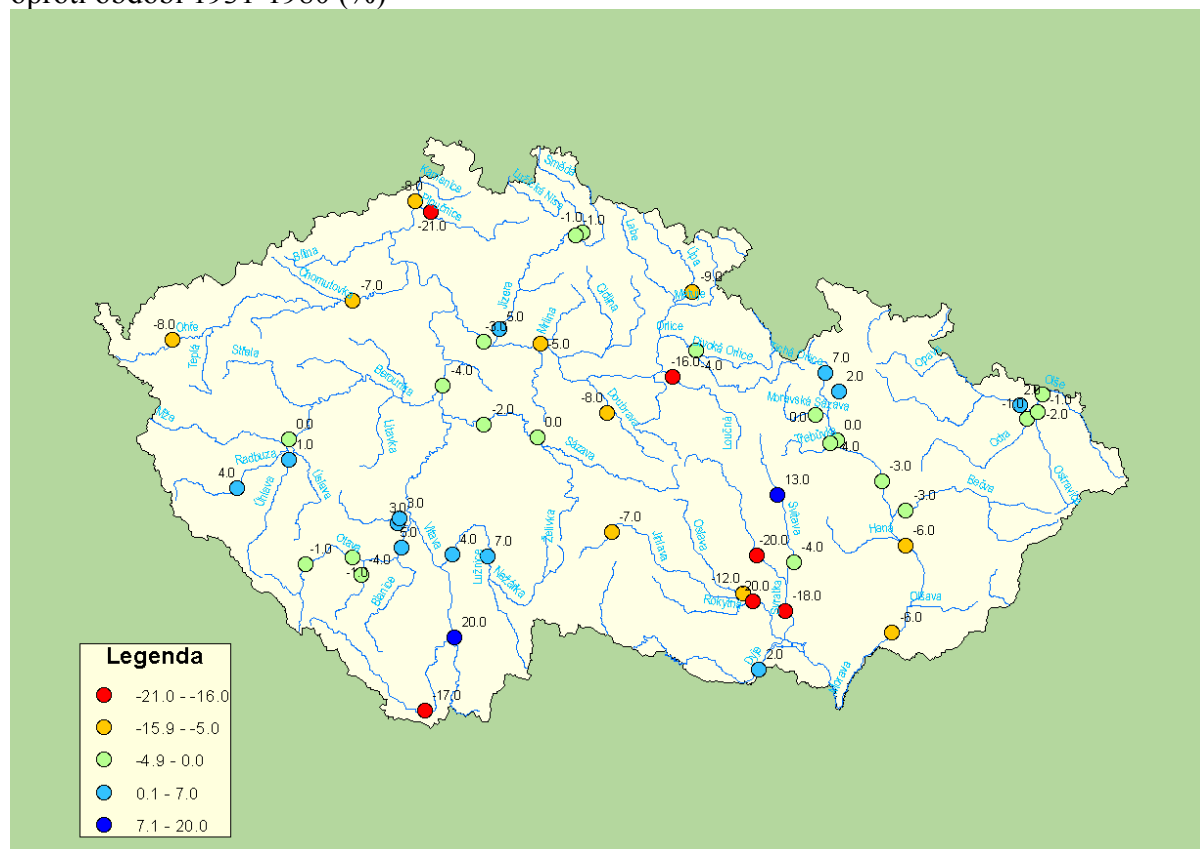
Nejprve bylo provedeno srovnání průměrných průtoků „starého“ a „nového“ období (viz obr. 4). Průměrné denní průtoky se z celkového pohledu výrazně nezměnily: oproti starému období se snížily o 1.3 %. Rozdíly o více než 10 % byly zaznamenány pouze na čtyřech stanicích, přičemž o nárůst se jednalo na Jizeře na stanici Tuřice-Předměřice (+10.3 %) a o pokles na Sázavě na stanicích Kácov a Poříčí nad Sázavou a na Svitavě na stanici Letovice. Změny u všech zmíněných stanic jsou však výrazně ovlivněny antropogenní činností (odběry vody).

Obr. 4: Změny průměrných průtoků vybraných stanic období 1961-2005 oproti období 1931-1980 (%)

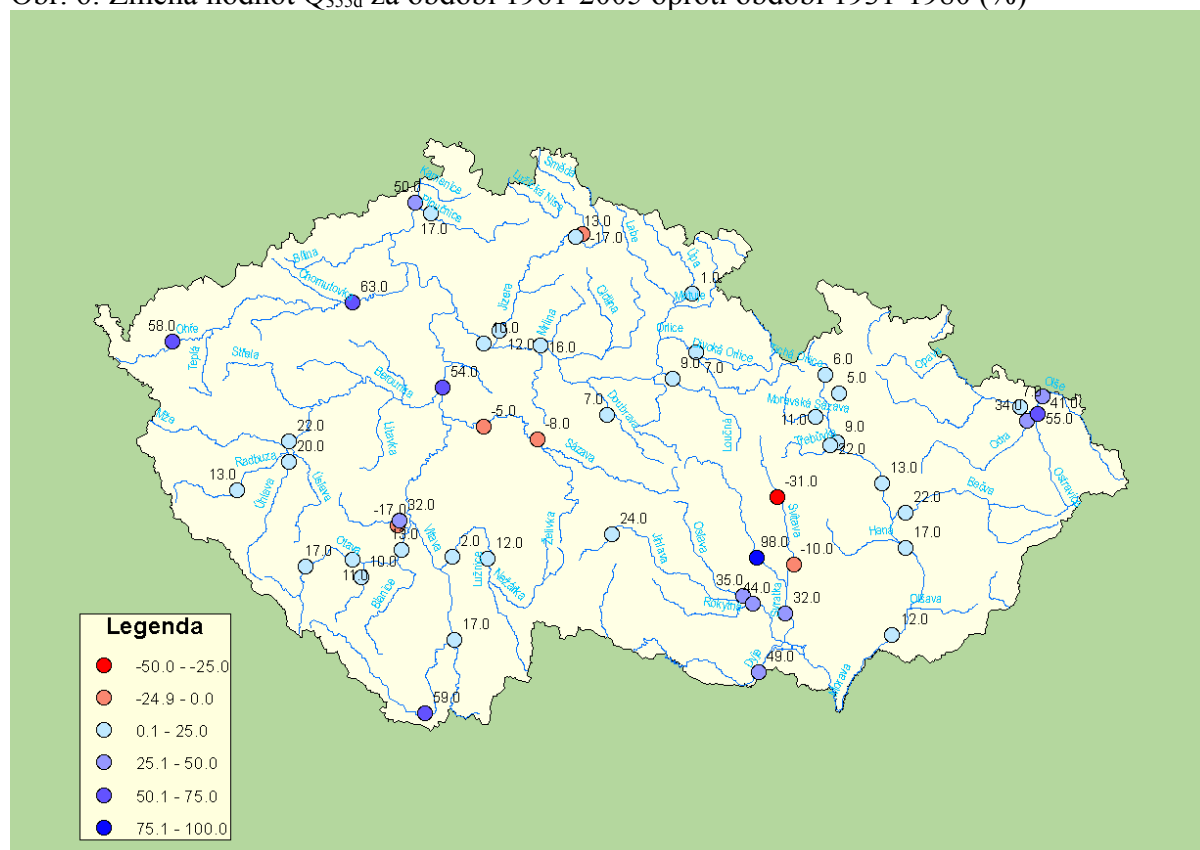


Dále bylo provedeno statistické srovnání rozkolísanosti průměrných denních průtoků „starého“ a „nového“ období. Hodnoty koeficientů variace kolísají v rozmezí ± 20 %, přičemž největší snížení se objevuje na jihomoravských stanicích v povodí Jihlavy a Svatky a naopak největší zvýšení vykázala stanice Roudné na Malši. V celkovém průměru se hodnoty koeficientu variace snížily o téměř 3 %, k čemuž pravděpodobně přispěla výstavba přehradních nádrží s jejich funkcí nalepšování malých a zmenšování velkých průtoků.

Obr. 5: Změna koeficientu variace průměrných denních průtoků období 1961-2005 oproti období 1931-1980 (%)



Obr. 6: Změna hodnot Q_{355d} za období 1961-2005 oproti období 1931-1980 (%)



Ovlivnění hydrologických charakteristik výstavbou nádrží se projevilo také na změnách hodnot M-denních průtoků. Zatímco u hodnot Q_{30d} není snížení výrazné (průměrný pokles o 2.7 %), nalepšování velmi nízkých průtoků nádržemi je evidentní (viz obr. 6). Příkladem je stanice Praha, kde se vlivem vltavské kaskády zvýšila hodnota Q_{355d} z $30.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na $47 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tj. nárůst o 54 %). Průměrně vzrostla hodnota Q_{355d} o téměř 20 %.

5. Závěr

Odvozování nových hydrologických charakteristik řad průměrných průtoků na českých tocích je teprve ve svém počátku. Nicméně již toto první přiblížení naznačuje, jakým způsobem se průměrné denní průtoky na českých tocích změnily. Průměrné denní průtoky a jejich rozkolísanosti jsou velmi podobné hodnotám odvozeným za období 1931-1980. Výraznější změny lze očekávat u M-denních vod a to především u „extrémnějších“ hodnot, jako jsou Q_{5d} , Q_{10d} , Q_{355d} a Q_{364d} . Hodnoty těchto ukazatelů budou kromě jiného ovlivněny lidskou činností, a to zejména provozem přehradních nádrží a odběrem vody.

LITERATURA

[1] KAŠPÁREK, L. a kol. (1999): Metody výpočtu hydrologických dat v měnicích se podmínkách. Metody zpracování dat v nestacionárních podmínkách. Číslo úkolu 1043/210, VÚV TGM, Praha, 25 stran.

[2] ŠIPIKALOVÁ, H., ŠKODA, P., MAJERČÁKOVÁ, O. (2003): Nové hodnotenie hydrologických charakteristik. Vodohospodársky spravodajca, 4, Združenie zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve na Slovensku, Bratislava, str. 21-23.

Theodor Fiala: THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MEAN DAILY DISCHARGE SERIES ON CZECH STREAMS - CHOICE OF A NEW PERIOD AND COMPARISON WITH THE PERIOD 1931-1980

Recently, the Department of Surface Waters of the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) has dealt with choosing a new period for the evaluation of hydrological characteristics for daily average discharge series. These characteristics are an important part of hydrological studies and reviews. For many years, calculating the characteristics using as long data series as possible was considered ideal. Nevertheless, during 1990s hydrological studies showed that this approach disregard the climate oscillations and the human impact, which affect oscillations of the hydrological system. Using only 40-50 year long data series was advised.

The Slovak Hydrometeorological Institute decided about the new period soon after the beginning of 21st century and they completed the computation in 2005. In the Czech Republic, the task was put aside because of the need to evaluate extreme hydrological events that occurred in recent years. This year the work on choosing a new period has finally begun.

At first, two possible periods were suggested. First one, 1961-2000, was the same as the period used in Slovakia. As extreme hydrological events (e.g. floods in 1997 and 2002, drought in 2003) took place in recent years, period 1966-2005 was the second to be considered, because the extreme discharges could significantly influence the hydrological statistics. These two forty-year-long periods

were statistically compared. The long-term average discharges do not vary much, the average change shows an accretion of only 0.3 %. There is an evident spatial difference where most of the stations in Labe basin show an accretion and stations in Odra and Morava basins have the opposite tendency. However, changes at stations vary only from -6.1 % to +6.8 %. The second part concerned a comparison of the variation coefficient. Although the extreme years covered in the later period suggested higher values of the coefficient, truth was the opposite. At 87 % of stations the variation decreased. This must have been a result of highly fluctuating discharges in the first part of the 1960s. This fluctuation was later proved and it strongly influenced the final decision. To cover extreme years in early 1960s and in the recent years, period 1961-2005 was chosen finally.

How did the discharge characteristics change between 1931-1980 and 1961-2005? For the first comparison stations with uninterrupted data series were chosen. There are fifty of them in the gauging station network in the Czech Republic.

The average long-term discharges changed very little. The 1961-2005 average is 1.3 % smaller than the average of the „former“ period. Exactly one half of the stations experienced discharge accretion with Tuřice - Předměřice at Jizera river reaching the highest (+10.4 %). Similar results brought the comparison of the variation coefficients. Differences vary from -20 to +20 % with the mean value being 3 % smaller than the value of 1931-1980. Among specific M-day discharges, Q_{355d} showed a significant change. At 88 % of stations, the value increased (average increase +19.8 %). Smaller variation coefficient and greater Q_{355d} discharge might not have just a natural purpose but could be affected by anthropogenic factors too (e.g. dam management, drawing of water).

Theodor Fiala, Český hydrometeorologický ústav
Na Šabatce 17, 143 06 Praha
fiala@chmi.cz

Článek 3

FIALA, T. (2008): Statistical Characteristics and Trends of Mean Discharges of Period 1961–2005. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 56, č. 2, SAV, Bratislava, str. 133–140.

STATISTICAL CHARACTERISTICS AND TRENDS OF MEAN ANNUAL AND MONTHLY DISCHARGES OF CZECH RIVERS IN THE PERIOD 1961–2005

THEODOR FIALA

Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4-Komořany, Česká republika; fiala@chmi.cz

The Surface Water Department of the Czech Hydrometeorological Institute in 2006 selected a new period for the evaluation of hydrological characteristics of mean daily discharge series. Initially, two forty-year long periods were considered: 1961–2000 and 1966–2005 and the period of 1961–2005 was finally accepted.

Comparison of the still used 1931–1980 period with the new one was carried out using the data from 50 Czech gauging stations that had continuous data time series. The mean long-term runoff of Czech rivers changed very little from 1931–1980 to 1961–2005. Comparison of the variation coefficients brought similar results. However, among specific M-day discharges the low flow values (e.g. Q_{355d}) showed a significant increase. This might reflect not only natural causes but could suggest anthropogenic factors as well.

Trend analyses started with testing mean annual runoff at 65 Czech gauging stations that were not influenced by human activity. 34 stations showed an increasing trend and 31 a decreasing trend. However, the trend was statistically significant only at one station. Trends of individual months dramatically differentiate. In January through March the increasing trends prevail. March trends show the highest number of stations with a significant increase. The three following months are complete opposites in which decreasing trends dominate. In May and June, not a single increase was recorded and many decreases were statistically significant. Almost no significant trends were examined in the months of the second half of the year.

KEY WORDS: M-Day Discharge, Reference Period, Statistics, Trends.

Theodor Fiala: STATISTICKÉ CHARAKTERISTIKY A TRENDY PRŮMĚRNÝCH ROČNÍCH A MĚSÍČNÍCH PRŮTOKŮ NA ČESKÝCH TOCÍCH V OBDOBÍ 1961–2005. J. Hydrol. Hydromech., 56, 2008, 2; 5 lit., 6 obr.

V posledních měsících se oddělení povrchových vod ČHMÚ zabývalo výběrem období pro výpočet nových hydrologických charakteristik *M*-denních průtoků na českých tocích. Uvažována byla čtyřicetiletí 1961–2000 a 1966–2005, nakonec však bylo přijato období 1961–2005. Na datech z 50 vodoměrných stanic, které měly nepřerušené řady pozorování, bylo uskutečněno první srovnání statistických charakteristik období 1931–1980 (doposud používané) a 1961–2005. U nového období byly u neovlivněných stanic vyhodnoceny trendy průměrných ročních průtoků a průtoků jednotlivých měsíců.

KLÍČOVÁ SLOVA: *M*-denní průtok, statistika, referenční období, trendy.

1. Introduction

The Surface Water Department of the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) deals among others with secondary processing of hydrological data. The secondary processing includes derivation of basic hydrological characteristics, primarily *M*-day and *N*-year discharges. These characteristics form an important part of hydrological assessments and studies which serve as the basis for construction and management of hydraulic facilities and equipment, flood protection, flood evaluation, etc.

Hydrological Conditions of CSSR (1965) was the first important work elaborating the hydrological characteristics including *M*-day and *N*-year discharges. A thirty-year long period from 1931 to 1960 was evaluated. Twenty years later, a new representative period for the hydrological evaluation of *M*-day discharges was requested. Hence new characteristics were derived, that time for the period of 1931–1980.

In the 1990s, new hydrological studies called into question the suitability of previous evaluation periods. Results of those studies were as follows:

- Long time series are suitable for describing a general hydrological regime. They are also useful for the derivation of extreme characteristics, e.g. N -year maximum or minimum flows.
- On the other hand, for the derivation of characteristics that describe recent or even future situations, long time series can be misleading because they ignore climate oscillations and human activities which may change the runoff dramatically.
- Conclusively, it is not recommended to extend the evaluation period above 50 years. To derive hydrological characteristics, it is best to use 40–50 year long series and update them every 10 or 20 years (Kašpárek a kol., 1999).

2. Selection of a new period

In Slovakia, the evaluation period 1961–2000 was chosen. Besides the above-mentioned scientific suggestions, the Slovak Hydrometeorological Institute period also reflects the fact that the hydrological gauging station network was developed and stabilized during those 40 years (Šipikalová, Škoda, Majerčáková, 2003). The evaluation of basic hydrological characteristics was finished in 2005.

Czech hydrologists, however, began this task not sooner than in 2006. The reason for such a delay was the extreme hydrological events that took place in recent years. CHMI hydrologists evaluated events such as the floods which occurred in July 1997 in Moravia and in August 2002 in Bohemia, thus postponing their work on the selection of a new period. But in the last few years, clients of CHMI have often demanded characteristics which reflect current hydrological conditions. Selection of a new period and derivation of new hydrological characteristics of Czech rivers were inevitable.

Similarly to the Slovak case, Czech hydrologists took their directive from the then latest scientific studies and kept to the recommended 40 to 50-year long period. After discussions, two variant periods were suggested: 1961–2000 and 1966–2005. These periods were to be compared for the final decision.

Both periods have their advantages and disadvantages. The advantage of 1961–2000 is undoubtedly the fact that the characteristics of Czech rivers could be easily compared with the Slovak ones as the period mirrors theirs exactly. On the other hand, a great disadvantage of this period is that it lacks some hydrologically important years, namely, the extremely wet year of 2002 followed by a dry year in 2003. Omission of these years might strongly

influence the statistics. It is the major advantage of the 1966–2005 period that it includes these years.

The two suggested periods were compared using data from 93 selected gauging stations that had uninterrupted time series of mean daily discharges for the time span 1961–2005. Statistical evaluation was processed within the CTPA (Change and Trend Problem Analysis) programme. Basic statistical characteristics (e.g. mean, standard deviation, variation coefficient, histogram) and normality tests (e.g. test of skewness, Kolmogorov-Smirnov test) as well as trend tests are computed.

Firstly, long-term mean runoffs, $Q_{1961-2000}$ and $Q_{1966-2005}$, were compared. Differences vary from –6.1 % (Rychmanov gauge on the Cezava River, South Moravia) to +6.8 % (Staňkov gauge on the Radbuza River, Western Bohemia). Generally, the runoff did not change considerably; the average was an increase of 0.3 %.

Secondly, variation coefficients of mean annual runoffs were compared. For the very wet year 2002 and the very dry year 2003, the variation coefficients of the latter period were expected to increase. However, this happened at only 12 of the 93 stations. In 87 % of cases, the coefficient decreased with the overall change being –5.3%.

This change in the variation coefficients indicated that the discharges during the first half of the 1960s fluctuated even more than those at the beginning of the 21st century. To test this hypothesis, the years 1961–2005 were taken as one period and statistical characteristics of this period were again processed for each station. Mean annual discharges were transformed to percentage proportions of the long-term 1961–2005 means. These proportions from every station of one year (e.g. 93 values of year 1961 proportions) were averaged to obtain a number describing the runoff situation of the whole country. The higher the number, the greater the runoff of the certain year. For example for 1965, the value is 1.65, which means the average annual runoff exceeded the long-term average by 65 %.

As we expected, wet year 2002 followed by dry years 2003 and 2004 represent a significant peak and trough. Nevertheless, values for the first half of the 1960s showed greater fluctuation with dry years 1963 and 1964 and an extremely wet year in 1965, clearly indicating why the variation coefficient of 1961–2000 was higher than that of the latter period.

Not wanting to disregard the hydrologically "interesting" years within either proposed period, it was decided that *the new period for the evaluation of hydrological characteristics would be 1961–2005*.

3. Comparison of selected characteristics: period 1961–2005 to period 1931–1980

For the statistical comparison, 50 gauging stations were selected. Stations with uninterrupted daily discharge time series in the period 1931–2005 were chosen. The condition to choose stations unaffected with the human impact was not raised and thus both stations influenced and uninfluenced were included.

At first, mean long-term runoffs of the „new“ and „old“ periods were compared (see Fig. 1). The average change is rather small: an increase of 1.3%. Changes of more than 10% were found at four gauges only. The biggest increase appeared at Tuřice-Předměřice on the Jizera River (+10.3%). The largest drops occurred at two stations on the Sázava River, Kácov and Poříčí nad Sázavou, and Letovice on the Svitava River. However, the latter changes were strongly influenced (or completely caused) by human impact (water withdrawals).

Secondly, comparison of the variation of mean daily discharges was processed. The differences between the variation coefficients range from –20 to +20 % with the greatest decreases at the Jihlava River and Svatka River basins and greatest in-

creases at Roudné gauging station on the Malše River. The overall average fell by almost 3 %, which is probably caused by the dams, that were constructed during the 20th century, and the reservoir management. This management improved the low flows and partly reduced the floods thus diminishing the variation coefficients.

The reservoir management did not only influence the variation coefficients, but also the values of M -day discharges. As the capacity to reduce a flood wave at dams is limited, the M -day values of high water did not lower much (e.g. the decrease of 2.7 % at Q_{30d} discharge). On the contrary, improving flows during drought significantly changed the M -day values of low flows (see Fig. 2). One of the cases is the Vltava River in Prague, where due to the Vltava River cascade the Q_{355d} discharge increased from $30.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ to $47 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (that is an increase of 54 %). On average, the Q_{355d} value increased by almost 20 %. It is necessary to point out that these data are strongly influenced by the reservoir management. Thus, for the clients of CHMI both influenced and uninfluenced characteristics will be provided.

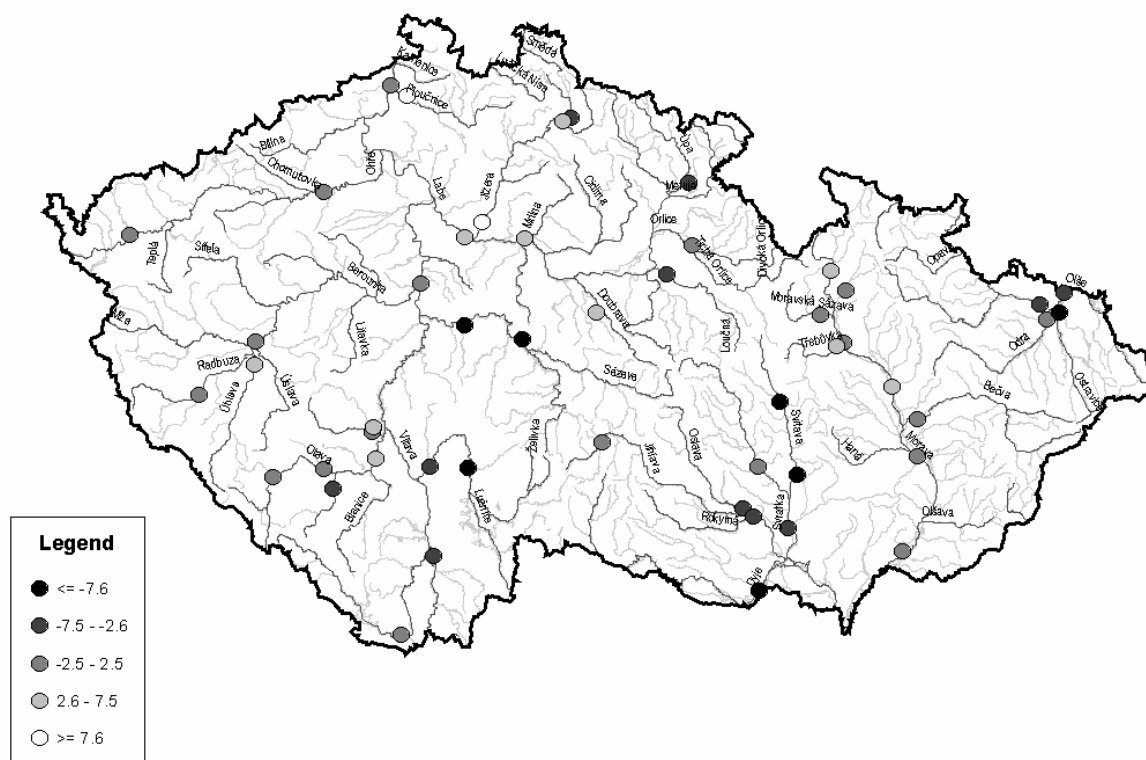


Fig. 1. Changes of discharges at selected stations, period 1961–2005 to period 1931–1980 [%].

Obr. 1. Změny v dlouhodobém ročním průměrném průtoku u vybraných stanic, období 1961–2005 oproti období 1931–1980 [%].

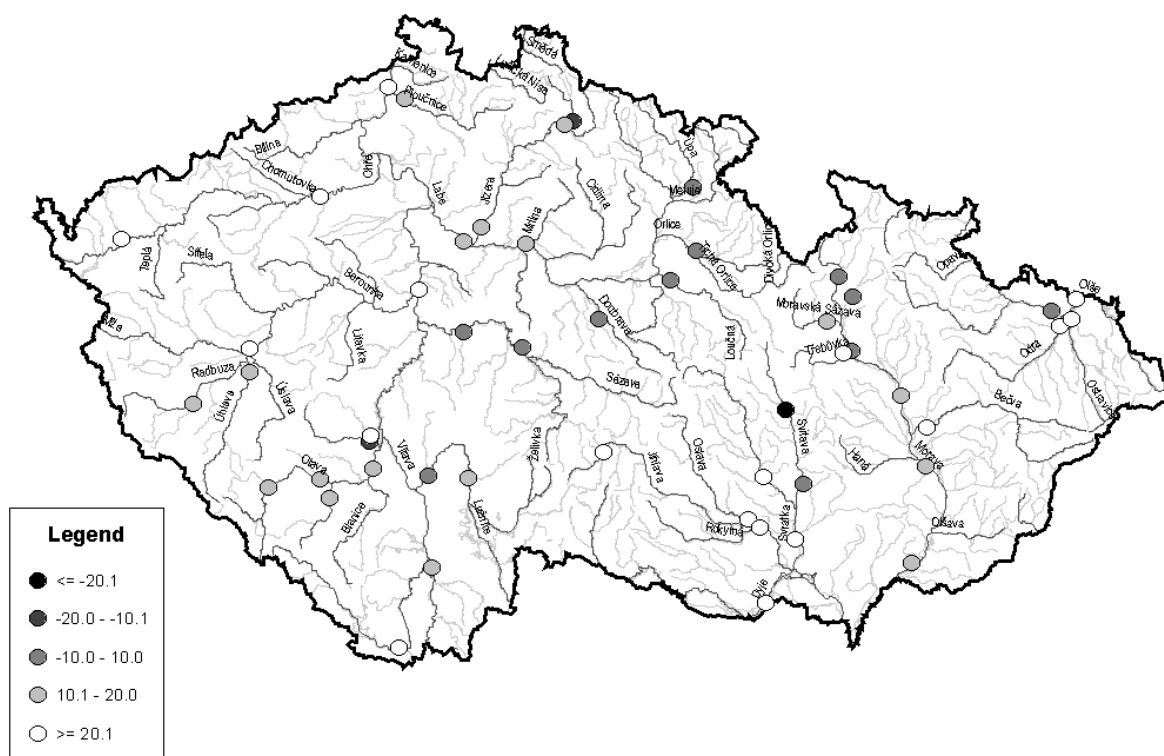


Fig. 2. Changes in M-day discharge, Q_{355d} , period 1961–2005 to period 1931–1980 [%].

Obr. 2. Změna hodnot Q_{355d} , období 1961–2005 oproti období 1931–1980 [%].

4. Trend of the period 1961–2005

For the trend analysis, gauging stations that were not influenced by human activities were selected. That means stations downstream close to dams and reservoirs were excluded. In this case, we wished to focus on the natural development. The selection of the stations was consulted with and partly modified by CHMI regional branches. Finally, 65 stations were selected; 38 within the Labe River basin, 11 from the Odra River basin and 16 from the Morava River basin.

First, trends of mean annual discharges were processed. To simplify the interpretation of the results, each trend was evaluated either as increasing or decreasing. The category “No trend” was not delimited. Within all tests, a 5 % significance level was applied. From 65 stations, an increasing trend was detected at 34 stations, while a decreasing one at 31. A statistically significant trend was found at only one station: Klášterec nad Orlicí on the Orlice River showed a significant increase. There is a geographical dependence in trend distribution (Fig. 3). In the north and west the increases prevail, while in the south and east the decreases abound.

Further, trends of monthly streamflows were tested. The number of stations with an increasing/decreasing trend varies dramatically from month to month (see Fig. 4). From January to March, the increases dominate. For January alone, an increasing trend was detected at 94% of stations. However, most of the January trends were insignificant. March is the month with the highest number of stations showing significant streamflow increases (Fig. 5).

From April to June, trends change and decreases predominate. While there are still a few increases in April, flows of May and June diminish at every station. A 5% significance level of the trend test implies that there is a 5% probability of incorrectly rejecting the null hypothesis. In other words, a few stations could have detected significant trends although no trends were present. However, in May and June, a considerable number of water gauging stations with statistically significant decreasing trends are present. There are 20 gauging stations with significant decreases in May and 32 (49% of all stations) in June, which is the maximum number of significantly decreasing trends recorded for one month (Fig. 6).



Fig. 3. Trends of annual streamflows in the period 1961–2005.

Obr. 3. Trendy průměrných ročních průtoků v období hydrologických let 1961–2005.

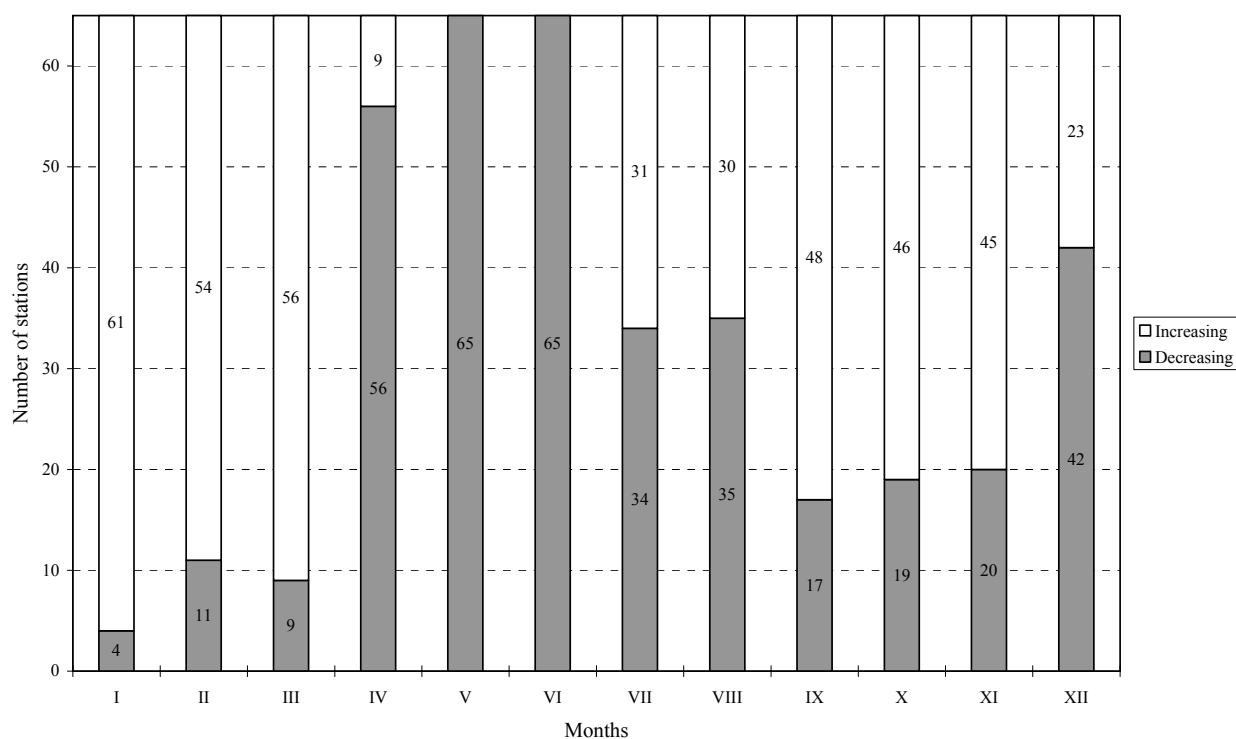


Fig. 4. Number of stations with increasing/decreasing long-term monthly runoff trends.

Obr. 4. Počet stanic s klesajícím resp. rostoucím trendem průtoků v jednotlivých měsících.

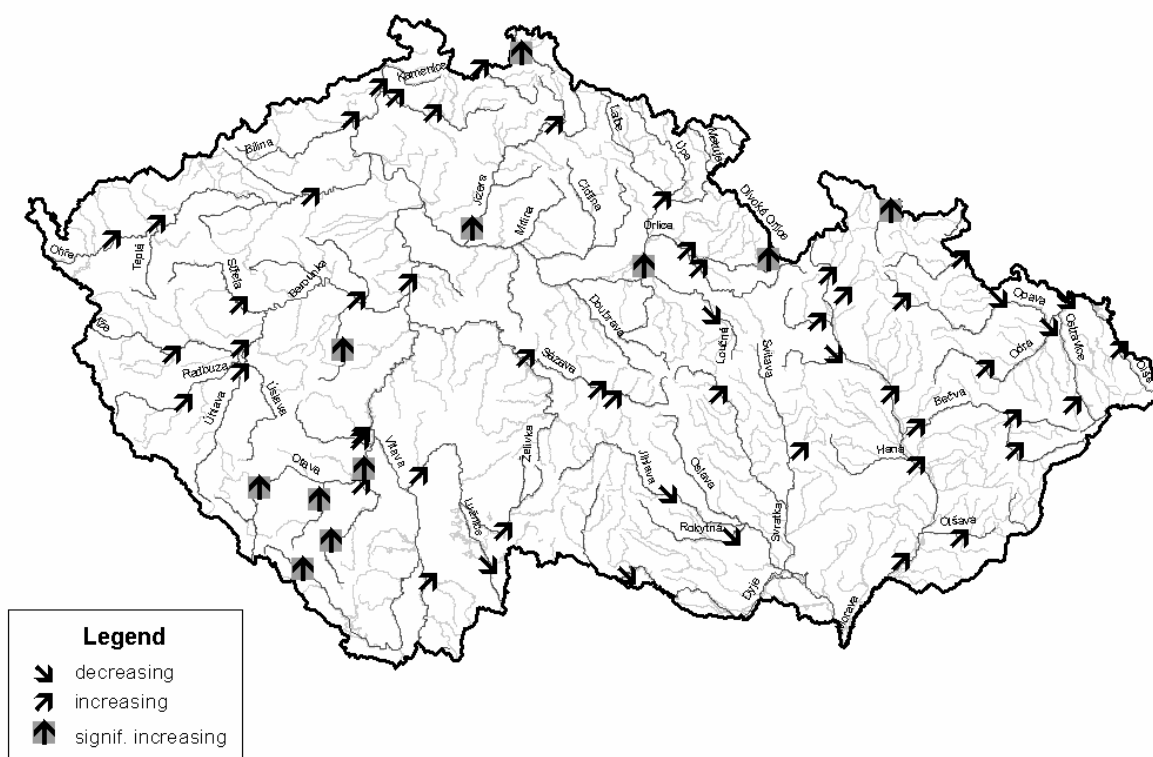


Fig. 5. Trends of mean March runoffs in the period 1961–2005.

Obr. 5. Trendy březnových průměrných měsíčních průtoků hydrologických let 1961–2005.

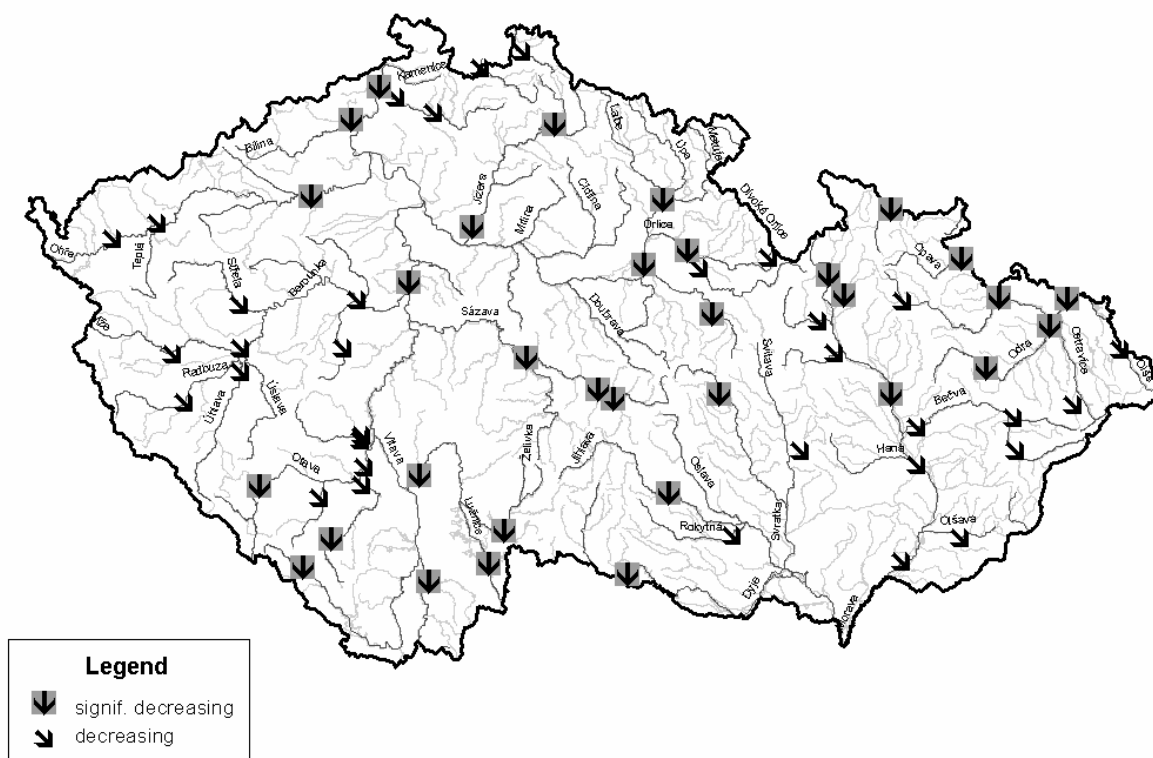


Fig. 6. Trends of mean June runoffs in the period 1961–2005.

Obr. 6. Trendy červnových průměrných měsíčních průtoků hydrologických let 1961–2005.

Trends of mean runoff in July and August and their spatial distribution across the country indicate that one extreme value in a time series can influence the final result. Flows of these months in Bohemia show inverse trends to those in Moravia. Almost across all of Moravia, July flows increased while they decreased at most Bohemian stations. The Moravian increases are probably caused by the flood that hit Moravia in July 1997. The results for August are completely opposite: decreases in Moravia and increases in Bohemia obviously due to the floods in August 2002.

From September through December no dramatic trends were found. The only exception is November trends in Western Bohemia, where several significant increases were recorded.

As stated at the beginning of this chapter, these trends were calculated for the period 1961–2005. If another period had been chosen, the data might have resulted in different trends. Trends at the same station for different periods may vary due to the nonstationarity of the climate. However, evaluating the nonstationarity was not part of this paper.

5. Conclusions

This paper assesses flow data in the period 1961–2005 which was chosen for the new evaluation of hydrological characteristics of mean daily discharges of streams in the Czech Republic. Characteristics of annual discharges are very similar to those of the previous analytical period, 1931–1980, yet considerable changes were discovered in *M*-day discharges, especially at „extreme“ values Q_{5d} , Q_{10d} , Q_{355d} and Q_{364d} . Values of these indicators are undoubtedly influenced by human activities such as reservoir management and water withdrawals.

Trends – evaluated for different, unaffected gauging stations – were evaluated both at annual and monthly flows at a 5% significance level. Time series of mean annual discharges do not show statistically significant trends. The only exception is gauging station Klášterec nad Orlicí on the Orlice River with a significant increasing trend. No big changes of annual numbers are predicted to continue in the future. Most of the climate scenarios and rainfall-runoff models suggest only small changes in precipitation and runoff for the area of the Czech Republic (e.g. Dankers et al., 2007).

Results of monthly runoffs are more variable. From January to March the increasing trends dominate with the highest number of significant cases

found in March. One of the probable causes is the warming of winters identified by Huth and Pokorná, 2004. Warmer winters mean that precipitation falls rather as rain than snow. Less snow is accumulated and runoff increases.

The three months following March provide stark contrast, in which the decreasing trends prevail. In May and June, not a single gauging station recorded an increase and many decreases were statistically significant (almost 50 % of stations in June). This may be explained by the temperature rise, which contributes to higher evapotranspiration. Also warmer winters mean less snowpack, which contributes less to the discharge during the spring months.

Trends of July and August show a spatial difference as Bohemia (Labe River basin) and Moravia (Morava and Odra River basins) record inverse trends. July runoff rises in Moravia, but drops in Bohemia. August trends are opposite. Trends in these months are obviously strongly influenced by the floods that hit Moravia in July 1997 and Bohemia in August 2002.

In contrast to the first part of the year, almost no significant trends were examined in the months of the second part of the year.

REFERENCES

- DANKERS et al., 2007: Future changes in flood hazard in Europe. In: Heinonen ed. (2007): Proceedings of the Third international conference on climate and water. Finnish Environmental Institute, Helsinki, ISBN 978-952-11-2790-8, pp. 115–120.
- HMÚ, 1965: Hydrologické poměry ČSSR. Hydrometeorologický ústav, Praha.
- HUTH R., POKORNÁ L., 2004: Trendy jedenácti klimatických prvků v období 1961–1998 v České republice. Meteorologické zprávy, 57, č. 6, str. 168–178.
- KAŠPÁREK L. a kol., 1999: Metody výpočtu hydrologických dat v měnících se podmínkách. Metody zpracování dat v nestacionárních podmínkách. Číslo úkolu 1043/210, VÚV TGM, Praha, 25 stran.
- ŠIPIKALOVÁ H., ŠKODA P., MAJERČÁKOVÁ O., 2003: Nové hodnotenie hydrologických charakteristik. Vodohospodársky spravodajca, č. 4, Bratislava, str. 21–23.

Received 16. October 2007

Review accepted 13. February 2008

STATISTICKÉ CHARAKTERISTIKY A TRENDY PRŮMĚRNÝCH ROČNÍCH A MĚSÍČNÍCH PRŮTOKŮ NA ČESKÝCH TOCÍCH V OBDOBÍ 1961–2005

Theodor Fiala

Oddělení povrchových vod Českého hydrometeorologického ústavu vybralo v roce 2006 nové období pro výpočet nových hydrologických charakteristik průměrných denních průtoků na českých tocích. Zpočátku byla zvažována dvě čtyřicetiletá období, a to 1961–2000 a 1966–2005. Po statistické analýze bylo nakonec vybráno období 1961–2005.

Nově vybrané období bylo statisticky srovnáno s dosud používaným normálovým obdobím 1931–1980. Byla použita data z 50 českých vodoměrných stanic, které měly nepřerušené řady průměrných denních průtoků. Dlouhodobý průměrný průtok se změnil jen velmi

málo. Také srovnání hodnot variačního koeficientu přineslo s výjimkou nízkých průtoků podobný výsledek. U charakteristik nízkých průtoků (např. M -denní průtok Q_{355}) byl zjištěn významný nárůst hodnot. Tento nárůst je však do značné míry způsoben vlivem člověka.

Analýzy trendů za období 1961–2005 byly uskutečněny na 65 stanicích, které nebyly – případně jen velmi málo – ovlivněny lidskou činností. U 34 stanic byl zaznamenán rostoucí, u 31 klesající trend. Signifikantní trend byl zjištěn pouze na jedné stanici. Trendy průtoků v jednotlivých měsících se významně odlišují. Od ledna do března převažuje rostoucí trend, přičemž v březnu bylo zjištěno největší množství stanic se signifikantním rostoucím trendem. Tři následující měsíce jsou přesným opakem předchozích. Od dubna do června dominují poklesy, v květnu a červnu nebyla zaznamenána ani jedna stanice s rostoucím trendem a mnoho poklesů je statisticky významných. V druhé polovině roku nebyly zjištěny téměř žádné signifikantní trendy.

Redakční poznámka k referátu Theodora Fialy

STATISTICAL CHARACTERISTICS AND TRENDS OF MEAN ANNUAL AND MONTHLY DISCHARGES OF CZECH RIVERS IN THE PERIOD 1961–2005

Dosažené výsledky jsou zajímavé a vodohospodářské praxi se nabízí dlouho očekávaná verifikace hydrologických charakteristik, odvozených před více než čtvrt stoletím a zatížených nejistotou, zda zobrazují spolehlivě současný stav. Nejistota však bohužel přetrvává i u nově odvozených charakteristik v období 1961–2005. Její příčiny jsou dnes ovšem jiné. S posunem hodnoceného období směrem k současnosti se nepochybně zvětšilo v řadě stanic působení antropogenních faktorů, např. manipulací na nádržích, odběrů a spotřeby vody, ale též klimatické změny a d. Jde tu o typický případ nehomogenity a patrně i nestacionarity, které mohou podstatně ovlivnit vodohospodářské a jiné projekty.

Nehomogenita a nestacionarita v průtokových řadách bohužel zůstávají v referátu autora neujasněnými a nedořešenými otázkami, chybí tu aspoň základní úvaha o způsobu jejich řešení v nejbližší době. Autor v textu uvádí, že pro porovnání období 1931–1980 a nově zvoleného období 1961–2005 byl využit soubor 50 stanic s řadami průměrných denních průtoků, kde jediným kritériem jejich výběru bylo nepřerušené pozorování. Do souboru tak byly zařazeny ovlivněné i neovlivněné stanice, soubor se tak stal z tohoto hlediska nehomogenní. Významný nárůst hodnot M -denních průtoků se vysvětluje právě působením antropogenních faktorů.

Na jiném místě se naopak konstatuje, že pro analýzu trendů v řadách průměrných ročních a měsíčních průtoků za období 1961–2005 bylo použito 65 stanic, které nebyly ovlivněny lidskou činností nebo jen velmi málo. Čtenář z toho může usuzovat, že zjištěné změny trendů byly patrně způsobeny nestacionaritou geofyzikálních faktorů, které se ovšem mohou projevovat při jiné délce řad a v jiném úseku časové osy zcela odlišně. A v tom je jádro problému. Nejsložitější otázkou v současné době je ovšem ovlivnění hydrologických řad spolupůsobením antropogenních a geofyzikálních faktorů. I tato otázka čeká na výzkum.

Pro inženýrskou praxi (a nejen vodohospodářskou) je důležité zpracování a poskytování hydrologických dat pro řešení projektů a jiných úkolů v nejbližší budoucnosti. Pro jaké období a v jakých intervalech budou údaje aktualizovány? Žádoucí tu bude spolupráce uživatelů s ČHMÚ a posouzení, zda jde o řešení úkolu převážně pro nepříliš vzdálené podmínky (tam budeme dělat chybu zřejmě relativně menší) nebo úkolu pro vzdálenější budoucnost (tam se mohou chyby dramaticky zvětšovat). Na rozdíl od dosavadní dlouholeté praxe, kde jsme předpokládali homogenitu a stacionaritu hydrologických podmínek, bude užitečná aktualizace dat po kratších časových úsecích, při kterých mohou být tyto chyby menší. Je však tento přístup pro hydrologickou službu reálný?

Nezbývá než doufat, že autorovi se podaří v blízké době dořešit naznačené otázky, bude vodohospodářskou veřejnost informovat o nových výsledcích výzkumu a doporučí nám další postup v této důležité oblasti hydrologie.

Článek 4

KULASOVÁ, B., BOHÁČ, M., FIALA, T. (2008): Dopady změny klimatu na minimální průtoky. Sborník z Workshopu Adolfa Patery 2008 – Extrémní hydrologické jevy v povodí. ČVUT, Praha, ISBN 978-80-02-02113-1, 8 s.

Dopady změny klimatu na minimální průtoky **Climate change impacts on low flows**

Bohuslava Kulasová, Miloň Boháč, Theodor Fiala

Toto téma je řešeno v rámci grantového projektu „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“, který se zpracovává v období 2007 – 2011. Cílem řešení je odvodit vybrané hydrologické charakteristiky minimálních průtoků prezentující současný hydrologický režim (po analýze bylo zvoleno období 1961 – 2005) a charakteristiky prezentující budoucí hydrologický režim (odvozené ze simulovaných řad denních průtoků na základě scénářů klimatické změny). Následně budou tyto charakteristiky porovnány a výsledky vyhodnoceny. Pro hodnocení minimálních průtoků byly za období 1961 – 2005 odvozeny čáry překročení M-denních průtoků stanovené z denních průměrných průtoků a z řad denních průtoků vyrovnaných klouzavými průměry za 7 dní a N-leté minimální průtoky o trvání 7 dnů. Dále byly za toto období zpracovány trendy vybraných průtoků, a to průměrných ročních, měsíčních průtoků po jednotlivých měsících, ročních minimálních 7-denních průtoků a vybraných kvantilů M-denních průtoků.

This topic is part of the grant project „Specification of existing estimates of climate change impacts in hydrology, water management, agriculture and forestry sectors and proposals for adaptation options“ which is carried out in the period of 2007 – 2011. The aim is to derive selected hydrological characteristics of low flows which represent the recent hydrological regime (period of 1961 – 2005 was chosen) and also characteristics representing the future regime (from daily discharge series that will be simulated according to the climate scenarios). These characteristics (exceedence curves of M-day discharges from the mean daily and from 7-day moving average discharges, N-year minimum discharges of 7 days duration) will be compared and results evaluated. Furthermore, selected discharge trends: mean annual, time series of particular monthly discharges, minimum 7-day discharges and selected M-day discharges were computed.

Na začátku řešení byla zpracována rešerše české i zahraniční literatury, z které vyplývá, že některé země EU používají charakteristiky minimálních průtoků vztažené ke zvolenému trvání. Na základě dostupné literatury a našich zkušeností bylo rozhodnuto pro hodnocení minimálních průtoků odvodit čáry

Bohuslava Kulasová, Ing., Miloň Boháč, Ing., Theodor Fiala, Mgr.

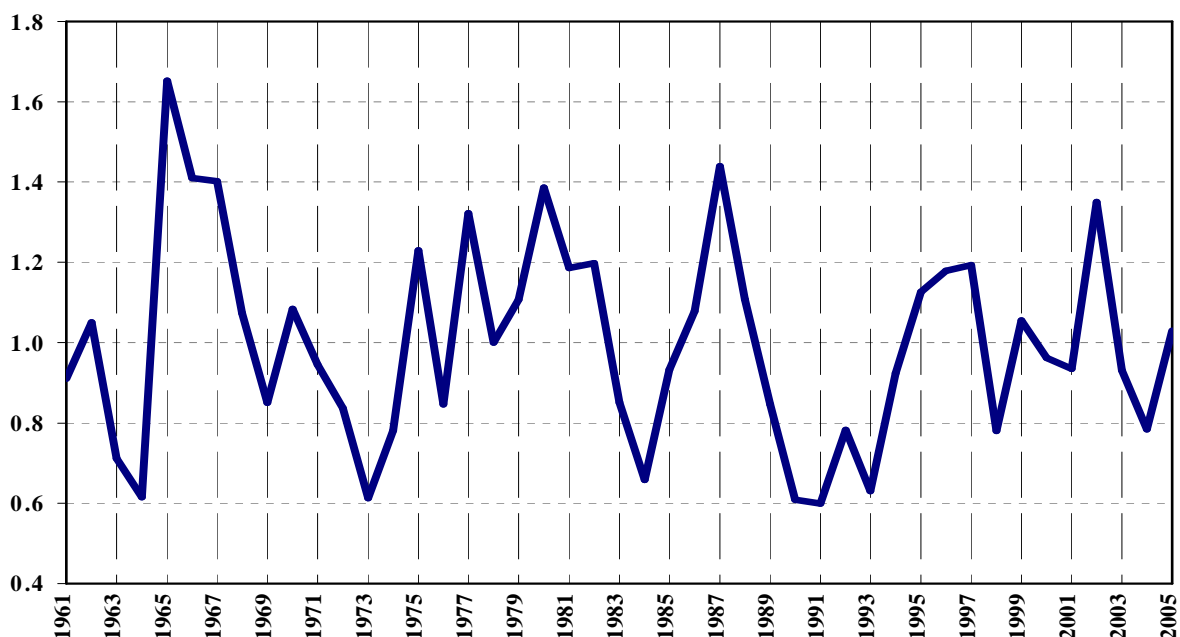
ČHMÚ, úsek hydrologie

Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4 - Komořany

tel. 244 032 302, fax: 244 032 342, e-mail: kulasova@chmi.cz

překročení M-denních průtoků stanovené z průměrných denních průtoků (běžný přístup) a navíc z řad denních průtoků vyrovnaných klouzavými průměry za 7 dní. Pro další hodnocení minim byly odvozeny N-leté minimální průtoky o trvání 7 dnů.

Nejprve byl proveden **výběr období** pro odvození charakteristik minimálních průtoků prezentujících současný hydrologický režim. Po analýze různých variantně uvažovaných období, viz obr. 1, bylo rozhodnuto, že nové charakteristiky budou odvozeny za období 1961 – 2005.

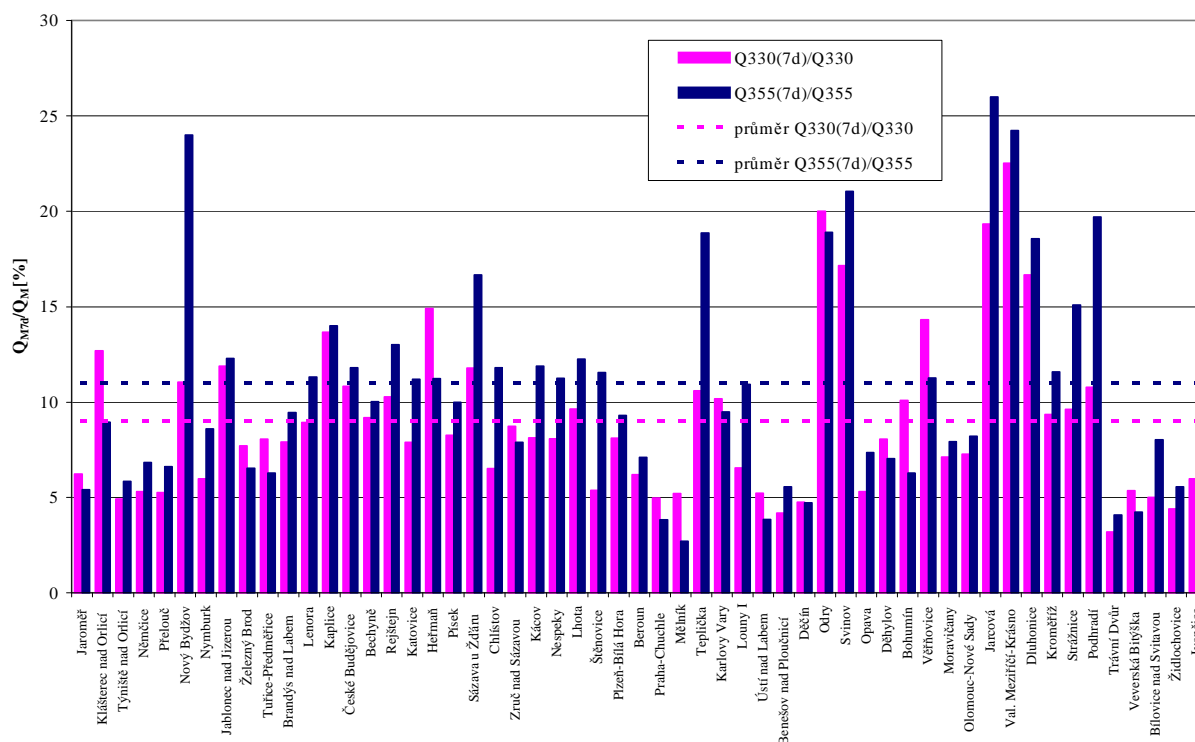


Obr. 1 Poměry průměrných průtoků v jednotlivých rocích (z cca 100 stanic v ČR) k dlouhodobému průtoku za období 1961 – 2005

Ve vybraných vodoměrných stanicích v povodí Labe, Odry a Moravy byly odvozeny statistické charakteristiky M-denních průtoků a N-letých minimálních průtoků za toto nové období 1961 – 2005.

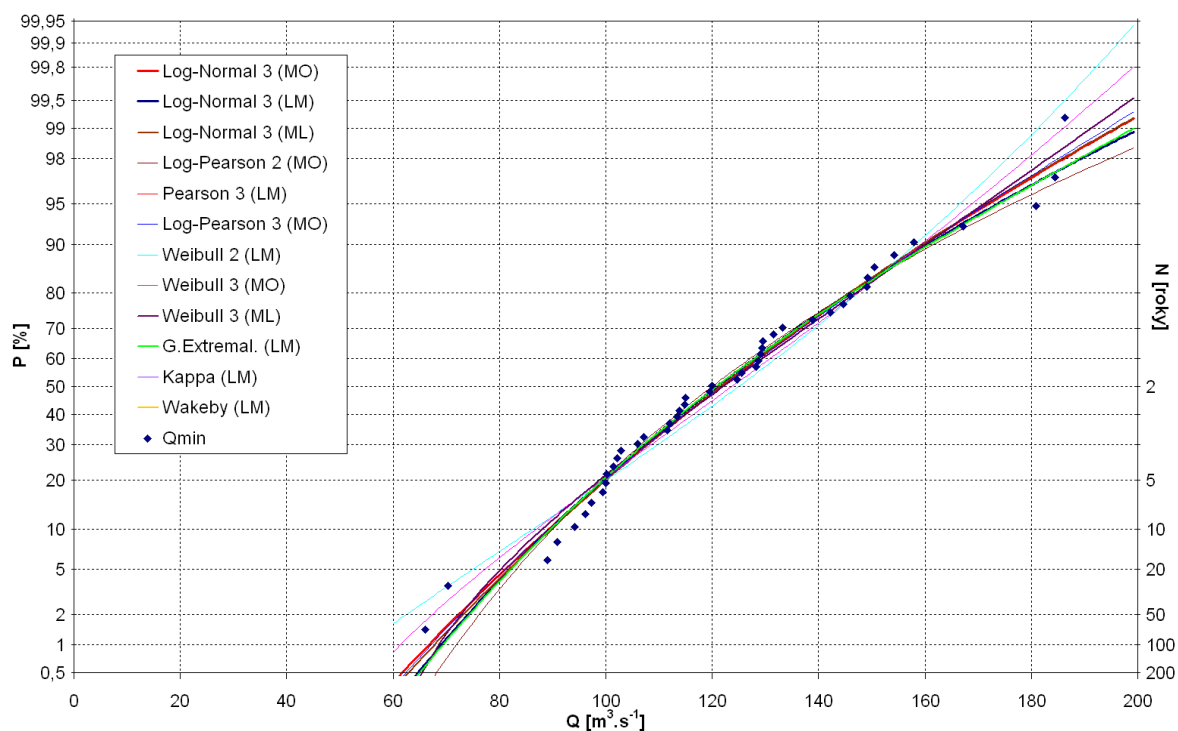
Z hlediska hodnocení minimálních průtoků se ve vodním hospodářství ČR nejčastěji používají kvantily **M-denních průtoků Q_{330} , Q_{355} a Q_{364}** z čáry překročení, které byly podrobeny analýze. Ve všech zpracovávaných stanicích byly zkoumány procentuální poměry těchto tří vybraných kvantilů vůči dlouhodobému průměrnému průtoku Q_a . Dále byly porovnány kvantily Q_{330} , Q_{355} a Q_{364} vypočítané z jednodenních a sedmidenních průměrů.

Průměrný nárůst sedmidenních průměrů je u průtoku Q_{330} 9 %, u Q_{355} 11 % a u Q_{364} 18 %. Největší nárůst příslušných kvantilů odvozených ze sedmidenních průměrů vykazují Cidlina, Rožnovská a Vsetínska Bečva, viz obr. 2.

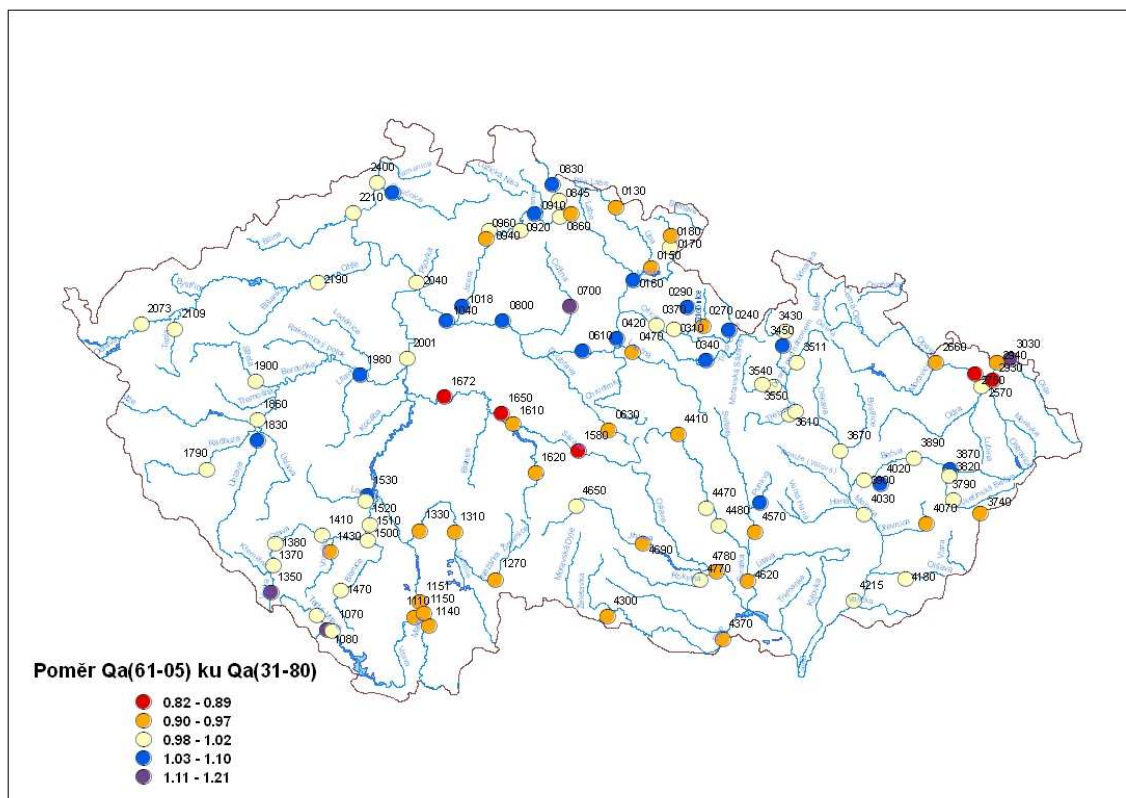


Obr. 2 Procentuální zvýšení průtoků Q_{330} a Q_{355} 7-denních ku 1-denním

Dále byly pro analýzu minimálních průtoků odvozeny **N-leté minimální průtoky s trváním 7 dní** za období 1961 – 2005 pro rozsah dob opakování $N = 2$ až 100 let. Pro výpočty byl použit německý program HYSTAT/NQ, který ČHMÚ obdržel v rámci česko-německé spolupráce. Byla zpracovávána 45letá řada nejmenších aritmetických průměrů sedmi po sobě následujících denních průtoků v každém roce, který začíná 1. dubna a končí 31. března následujícího roku. Program nabízí 22 teoretických rozdělení a tři metody odhadu parametrů (metoda momentů MO, logaritmických momentů LM a maximální věrohodnosti ML). Na základě tří testů shody (n -omega², χ^2 a Kolmogorov-Smirnov) a dle přiléhavosti k empirickým bodům se vybere nejvhodnější teoretické rozdělení. Pro povodí v ČR byly použity následující kombinace teoretických rozdělení a metod odhadu parametrů: Log-Pearson 3, MO (horní Labe, Jizera, Berounka, Odra, Opava, Svratka, Svitava, Jihlava), Generalizované extrémální, LM (Vltava, Lužnice, Otava, Sázava, dolní Morava, Dyje), Log-normální 3, MO (dolní Labe, Bečva), Log-normální 3, LM (Ohře, horní Morava), Weibull 2, LM (Cidlina). Na obr. 3 jsou ve stanici Děčín na Labi zobrazeny průběhy nejčastěji používaných teoretických rozdělení minimálních průtoků včetně empirických bodů.



Obr. 3 Teoretická rozdělení a empirické 7-denní minima v Děčíně na Labi



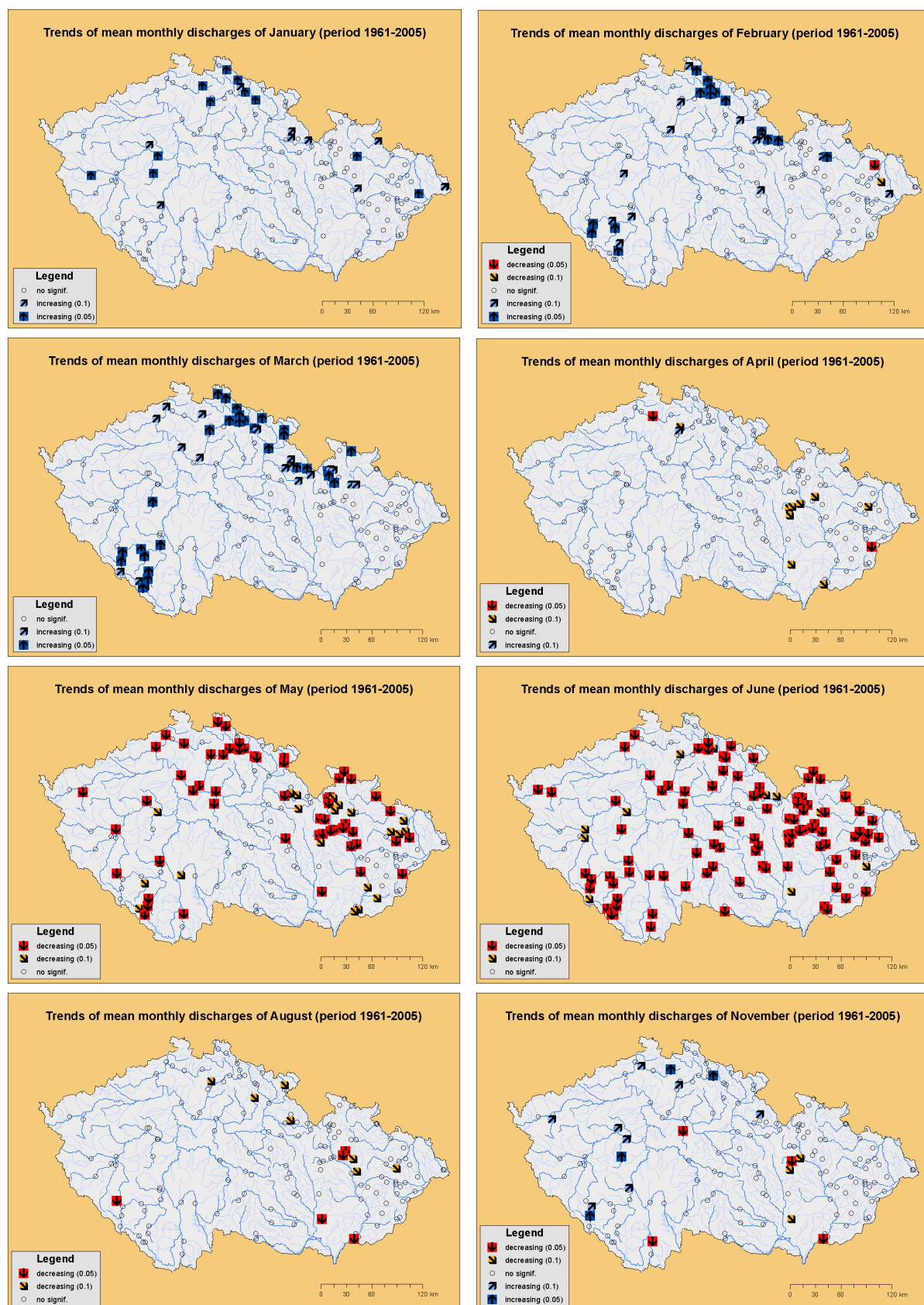
Obr. 4 Poměry dlouhodobých průtoků za období 1961 – 2005 a 1931 – 1980

Dále byly v cca 100 vodoměrných stanicích porovnány charakteristiky průměrných denních průtoků za období 1931 – 1980 a 1961 – 2005. V novém období se dlouhodobý průměrný průtok Q_a v průměru snížil o 0,5 %, viz obr. 4, průtok Q_{330} se zvýšil o 11 % a průtok Q_{355} se zvýšil o 16 % .

Hlavní náplní letošního roku bylo zpracování **trendů vybraných charakteristik průtoků** (průměrných ročních průtoků, průměrných měsíčních průtoků po jednotlivých měsících, tří nejmenších průtoků Q_{330} , Q_{355} a Q_{364} a ročních minimálních 7- denních průtoků) za zvolené období 1961 - 2005. Pro analýzu trendů bylo vybráno 148 vodoměrných stanic na tocích v ČR (73 z povodí Labe, 24 z povodí Odry, 49 z povodí Moravy a 2 z povodí Vlárý, která je přítokem Váhu), ve kterých jsou průtoky relativně neovlivněné (byly uvažovány i stanice na Labi pod Vltavou, i když jsme si vědomi ovlivnění minimálních průtoků zvláště Vltavskou kaskádou). Dalším kritériem pro výběr stanic bylo nepřerušené pozorování v období 1961 – 2005.

Pro výpočet testu trendu byl využit statistický program Matlab s modulem modifikovaného Mann-Kendalova testu pro odstranění autokorelace ve vstupních datech. Trendy byly vyhodnoceny na základě dvou zvolených hladin významnosti: 0.1 a 0.05. Pokud trend nebyl nalezen ani na hladině významnosti 0.1, výsledek byl označen jako bez trendu, pokud trend byl zjištěn na hladině 0.1 ale nebyl zjištěn na hladině 0.05, byl trend označen jako rostoucí, resp. klesající. Pokud trend byl nalezen na hladině 0.05, byl označen jako významně rostoucí, resp. významně klesající. Vypočítané trendy byly rozděleny do pěti skupin a následně vyneseny do map.

Z hlediska trendů vyšly nejzajímavější výsledky u průměrných měsíčních průtoků zpracovaných po jednotlivých měsících, viz obr. 5. V měsících leden až březen je největší počet stanic bez trendu, 15-30 % stanic má trend rostoucí. V březnu je cca u třetiny stanic trend významně rostoucí (koncentrují se do horských a podhorských oblastí). Jednou z příčin rostoucích trendů jsou pravděpodobně zvyšující se teploty v zimním období. Za vyšších teplot srážky častěji dopadají ve formě deště, méně vody je zadržováno ve sněhové pokrývce a odtok se zvyšuje. Poklesy trendů byly zjištěny jen v únoru na 2 stanicích (povodí Odry). V dubnu už začíná docházet k obratu (ztráta rostoucích trendů), přes 90 % stanic je bez trendu. V květnu je obrat v trendech dokonán, více než polovina stanic vykázala klesající trend, většina z nich významně klesající. Ještě výraznější situace je v červnu, u více než 70 % stanic byl zjištěn klesající trend, téměř u všech stanic významně klesající. Zmenšování průtoků v těchto měsících lze vysvětlit nárůstem průměrné teploty vzduchu a tím i evapotranspirace a poklesem srážkových úhrnů (Brázdil et al. 2008).

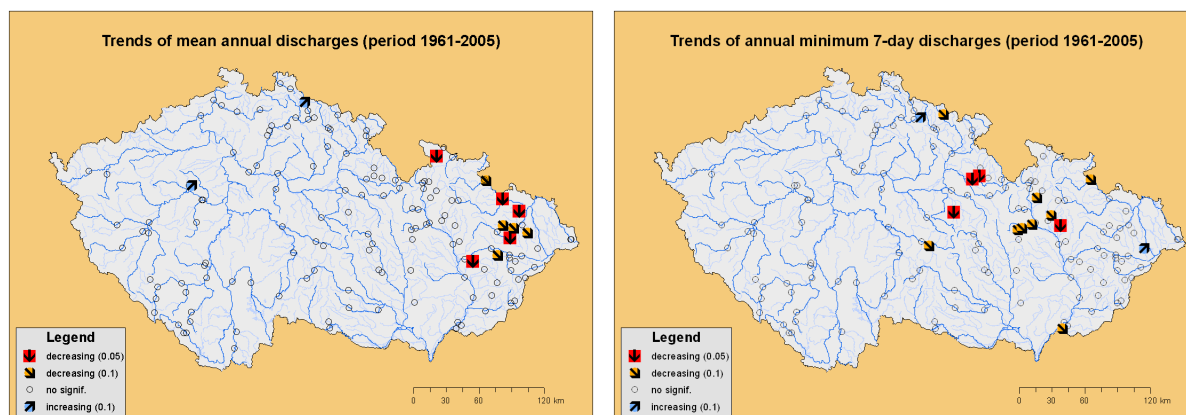


Obr. 5 Trendy vybraných průměrných měsíčních průtoků

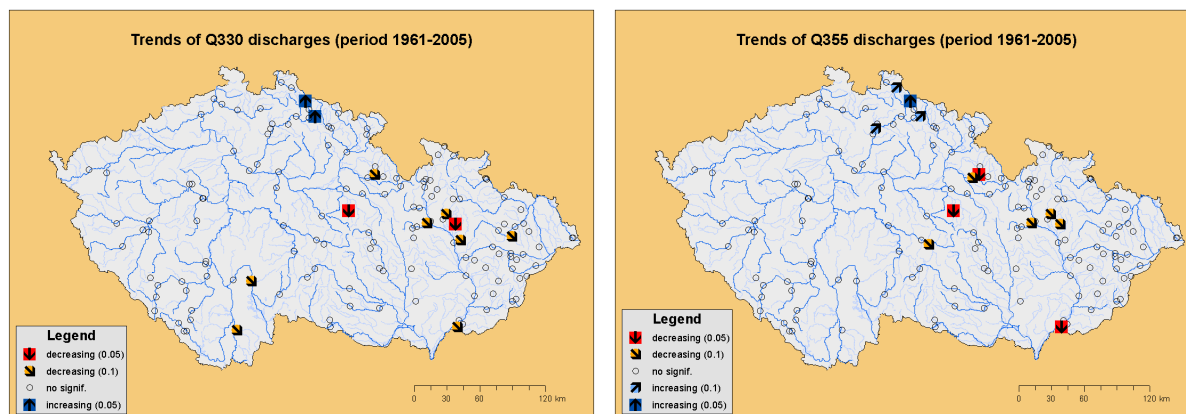
Druhá polovina roku je na trendy výrazně chudší. V červenci a srpnu se vyskytly pouze klesající trendy, zvláště v povodí Odry a Moravy. V září je trendů ze všech měsíců nejméně. Poklesy se opět vyskytují v horním povodí Moravy, vzrůsty v horním povodí Jizery. V říjnu se vyskytuje více klesajících trendů, ale v povodí Labe se objevuje několik rostoucích trendů. V listopadu se v povodí Labe (Otava, Berounka, Jizera, Orlice, Ohře, Ploučnice) vyskytují rostoucí trendy. Několik stanic s poklesy je především v povodí Moravy. V prosinci se vyskytly pouze 3 stanice s rostoucím trendem na Jizeře a 11 stanic s poklesy, opět v povodí Odry a Moravy.

Na obr. 6 jsou znázorněny trendy průměrných ročních průtoků a 7-denních minimálních průtoků. V ročním odtoku nedochází na území ČR k výrazným změnám, většina stanic je bez trendu. U ročních průtoků je rostoucí trend zaznamenán pouze u 2 stanic (Mumlava a Lánský potok). Stanic s klesajícím trendem je 10, z toho 5 s významně klesajícím (povodí Odry a Bečvy).

Trendy 7-denních minimálních průtoků nebyly ve většině stanic nalezeny. Rostoucí trendy se vyskytly jen u 2 stanic (Jizerka, Čeladenka). Klesající trendy byly zjištěny na levostranných přítocích horního Labe a v povodí horní Moravy.



Obr. 6 Trendy průměrných ročních a 7-denních minimálních průtoků



Obr. 7 Trendy M-denních průtoků Q_{330} a Q_{355}

U průtoků Q_{330} , Q_{355} a Q_{364} je většina stanic bez trendu, viz obr. 7. Rostoucí trendy se vyskytují v Jizerských horách. Klesající trendy jsou na levostranných přítocích horního Labe, v jižních Čechách a v povodí Moravy.

V dalším řešení (v letech 2009 – 2010) bude probíhat na několika vybraných povodích (Orlice, Jizera, Otava, Sázava, Opava nebo Bečva) odvození řad průměrných denních průtoků prezentujících budoucí hydrologický režim, které budou simulovány dle scénářů klimatické změny zpracovávaných klimatologi ČHMÚ a MFF UK v letošním roce. Z těchto simulovaných řad budou odvozeny charakteristiky minimálních průtoků prezentující budoucí hydrologický režim, bude následovat porovnání s charakteristikami současného režimu a výsledné zhodnocení.

Dále se předpokládá zpracování vybraných trendů za delší období (např. 1931 – 2005) a bude také provedena analýza frekvence výskytu velmi malých průtoků v povodí Labe v instrumentálním (cca od roku 1825) i v předinstrumentálním období.

Článek 5

FIALA, T., OUARDA, T., HLADNÝ, J. (2010): Evolution of low flows in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 393, Elsevier, Amsterdam, str. 206–218.



Evolution of low flows in the Czech Republic

Theodor Fiala^{a,b,c,*}, Taha B.M.J. Ouarda^a, Josef Hladný^{b,c}

^a Canada Research Chair on the Estimation of Hydrometeorological Variables, Hydro-Quebec/NSERC Chair in Statistical Hydrology, INRS-ETE, 490, de la Couronne, Quebec, QC, Canada G1K 9A9

^b Czech Hydrometeorological Institute, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4 – Komořany, Czech Republic

^c Dept. of Physical Geography and Geocology, Faculty of Science, Charles University of Prague, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Czech Republic

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 December 2009

Received in revised form 14 June 2010

Accepted 23 August 2010

This manuscript was handled by Andras Bardossy, Editor-in-Chief, with the assistance of Purna Chandra Nayak, Associate Editor

Keywords:

Low flows

Czech Republic

Trend

Deficit volume

Seasonal

Threshold

SUMMARY

This study investigates the temporal evolution of annual and seasonal low-flow regimes of 144 Czech river basins for the 1961–2005 period. Summer and winter low-flow seasons are identified and delimited. The gauging stations are classified into two categories, mountain and lowland, according to their low-flow regime. The standard and modified versions of the Mann–Kendall trend test were used in the study to detect trends in several low-flow variables. These include 7-day annual, summer and winter low flows, number of days with discharge under two low-flow thresholds and deficit volumes delimited with the same two low-flow thresholds. At majority of stations, trends in low-flow variables are not significant. Among significant trends, decreasing summer low flows, increasing winter low flows and increasing drought durations as well as deficit volumes are observed. Such combination of trends is typical for the north-eastern part of the Czech Republic and if it continues in the future this area might become drought-prone. It was found that proportions of positive and negative trends between mountain and lowland stations are similar. Thus the low-flow evolution is irrespective of the basins altitudes and climates. Dates of low flows were evaluated to study the evolution of the timing of summer and winter low flows. Non-significant trends prevail for the timing of seasonal low flows, but at a number of stations the dates of summer minima shift towards earlier dates. This can be explained by an earlier onset of the spring flood caused by warmer winters.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Climatic inputs influence various physical–geographical components of the environment. One of the strongest interconnections links climate and hydrology. Changes in climatic inputs result in changes in hydrological outputs. Changes in precipitation and temperature have direct impacts on river flows, watertable levels and spring yields. As stated in the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, 2007), the global average surface temperature is projected to increase during the 21st century and this rise could trigger changes in the hydrological cycle.

Hence a number of studies was carried out to identify changes in river flow regimes and to link these changes to climate changes. Studies dealing with the evolution of European climate and streamflows include those by Korhonen (2007), Hisdal et al.

(2007), Klavins and Rodinov (2007), Brilly (2007), Majerčáková et al. (2004) among others. These studies document recent trends in meteorological and hydrological variables in various countries and basins across Europe. A rising number of studies deal with modelling climate change and its impacts on river flows. Whatever uncertainties stem from the use of different models, there is a general view on how precipitation and temperature will develop in Europe. Precipitation is projected to rise in the western and northern parts of the continent, while it could decrease in the southern and eastern parts (see e.g. Blenkinsop and Fowler, 2007). The Czech Republic is located in an area that spreads between these two regions and where insignificant changes are predicted in annual precipitation depths. However, changes in runoff may appear in this area, as the mean temperature is projected to rise across the whole Europe and induced higher evapotranspiration could cause lower streamflows and increased droughts.

In northern Europe, increases in both precipitation and temperature imply insignificant changes in future runoff, but the contribution of both inputs is still difficult to estimate. Some studies suggest that increased temperature will fully compensate for the increase of precipitation and thus droughts may occur even in these regions. Southern Europe seems to be the most vulnerable part of the continent with predicted higher temperatures and less

* Corresponding author at: Dept. of Physical Geography and Geocology, Faculty of Science, Charles University of Prague, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Czech Republic. Tel.: +420 775999058; fax: +420 244032342.

E-mail address: fedik@seznam.cz (T. Fiala).

¹ The work presented herein was performed while the first author was an invited researcher at INRS-ETE, Quebec. He currently works at AON Benfield.

precipitation. These trends were already recorded in the data of the last several decades and pose a serious threat for water resource management in these countries (Todorovic, 2007; Brunetti et al., 2004; Piccarreta et al., 2004, and others).

As mentioned above, there are no strong trends in mean annual precipitation depths in Central Europe. Degirmendžić et al. (2004) did not find any significant trends in annual precipitation for the 1951–2000 period in Poland. Similar results were found for precipitations in the Czech Republic and the period 1961–2005 (Brázdil et al., 2008). Only Hungary reports a downward trend in precipitation with the largest decreases in March, April, September and October (Domonkos, 2003). Increases in temperature dominate both in annual, seasonal and monthly averages. For the Czech Republic, these increases in temperature trends are mainly dominant in the spring and summer. Negative trends were found only for the autumn (Brázdil et al., 2008). Unchanging precipitation depths and increasing temperatures may result in more frequent meteorological droughts as it was detected for example in the Elbe River basin by Krysanova et al. (2008).

Detected changes in climatic variables are related to changes in runoff all over Europe. The combination of more precipitations and higher temperatures in northern Europe has different impacts for different seasons. In the winter, runoff increases in the lowlands because more precipitation falls as rain rather than snow. Spring runoff increases in the mountains due to the intensified snowmelt. During the summer and the autumn, non-significant trends prevail (Hisdal et al., 2007; Roald et al., 2007). Similar tendencies were found for rivers in the Baltic States with the exception of the spring season for which runoff decreases and the timing of the spring flood peak shifts towards winter (Reihan and Loigu, 2007; Reihan et al., 2007). In the Mediterranean region and in the eastern part of Europe, higher temperatures and unchanged or smaller precipitation levels result in runoff decreases. This area might face a serious water scarcity problem as discharges are predicted to drop by 50% around 2070 (Dankers et al., 2007).

Within the central European region, decrease in runoff was detected in Slovak rivers. The greatest decrease was found during the autumn and winter months and in the southwestern part of the country (Majerčáková et al., 1997). These results were confirmed in a more recent study by Miklánek et al. (2007). In the Czech Republic annual runoff means do not show any significant trends but changes among monthly means are detected. Flows increase during the winter and decrease in May and June (Fiala, 2008). Predictions of runoff in Central Europe are not optimistic. Annual runoff is generally projected to decrease. Krysanová et al. (2005) modelled not only the annual, but also the maximum and minimum discharges and groundwater recharge in the German part of the Elbe River. All of these variables are predicted to drop with minima projecting the most severe decrease. Downward trends were also reported in several Slovak studies (e.g. Čunderlík et al. 1998; Danihilík et al., 2004). Lower flows may occur more frequently during the late spring and the summer and the opposite is expected for the winter. With warmer winters, snow cover and snow water equivalent are projected to decrease.

Identical predictions were made by Buchtele et al. (1999) for the Czech Republic using future climatic scenarios and the water balance model Sacramento. The probability of drought occurrence is expected to rise during the spring and summer and flows are expected to increase during the winter. Hladný (1996) modelled runoff responses to various temperature and precipitation changes on Czech rivers. The results show, for example, that a 5% precipitation increase would not compensate for a 2 °C temperature increase. In this case, annual flows would drop by 5–12%. The pessimistic scenario of 4 °C temperature increase and 5% precipitation decrease leads to a decrease in streamflows in some basins to almost half of the current state.

There has been a number of studies on floods in the Czech Republic. The objective of the present paper is to study the other tail of the streamflow distribution: hydrological drought, which has been a rather neglected phenomenon. Seasonality of low flows is studied and low-flow seasons are defined. Time series of various low-flow characteristics are tested for trends and the results are compared with trends of mean flows. Also change in the dates of low-flow occurrences is identified. Finally, drought-prone regions are delimited according to the spatial distribution of significant trends and streamflow tendencies are discussed with regard to detected changes in meteorological variables.

The remainder of the paper is organized as follows: The following section provides a description of the data used in the study and provides a description of the geographical conditions throughout the country. The Section 3 deals with the methodology of the study. The Section 4 presents the results of trend testing. The article concludes with a discussion of the results.

2. Data

The Czech streamwater gauging station network currently consists of more than 800 stations. Data measured and derived include: mean daily discharges, monthly discharge culminations, water temperature and suspended sediment load concentration. Mean daily discharges are measured at over 500 stations. More than 200 stations have uninterrupted time series since 1961. From this file, 144 stations in pristine or near pristine conditions were selected and the time span of 1961–2005 was chosen for this study. Eight series represented the combination of two stations each. In each case, the two stations gauged the same stream at very close locations, but none of these locations had a 45-year long record. In this case, the gap at one station is filled with data from the second station while respecting the ratio of long-term mean discharges of the two stations. Once a hydrological year is finished, data is checked for systematic errors. Then, data is loaded into the Czech hydrological database. The streamflow data for this study was obtained from this database.

To assess low flows, data in a time step of 1 day and spanning over tens of years are needed. In the Czech Republic, there are over 200 water-gauging stations, spread across the whole country, that have uninterrupted series of mean daily discharges back to 1960s. Due to the water management (dam manipulations, water withdrawals, etc.) about a third of the stations is affected by the human activity. Typically, many dams built in 1960s and 1970s enhance the discharge in low-flow periods. Hence, data from stations that are downstream of a dam could not be used. For this study, practically all of the unaffected stations in the country that gauge daily discharges since 1961 without an interruption were used and in this respect it is a very comprehensive dataset.

Since the Czech Republic is a relatively small country (total area: 78,866 km²), the differences in latitude and longitude for the various stations are negligible. The climate of the country, most distinctly temperature and precipitation, is driven by altitude. Generally the higher the altitude the colder and wetter the climate. The spatial distribution of mountains and lowlands is shown in Fig. 1. The mean altitude of the country is 430 m a.s.l. with a range from 115 to 1602 m. The mean annual temperature varies between +0.4 °C and 10.1 °C with an average of +7.3 °C. The winter is the coldest season when mean temperatures drop to +1 °C and –5 °C in the lowlands and in the mountains, respectively. The mean annual number of ice days (an ice day is defined as a day when the maximum temperature does not exceed 0 °C) ranges from 20 in the lowest altitudes to over 80 in the highest mountains (e.g. Krkonoše Mts. and Hrubý Jeseník Mts.). On the other hand, summer is the warmest season with mean temperatures ranging between 10

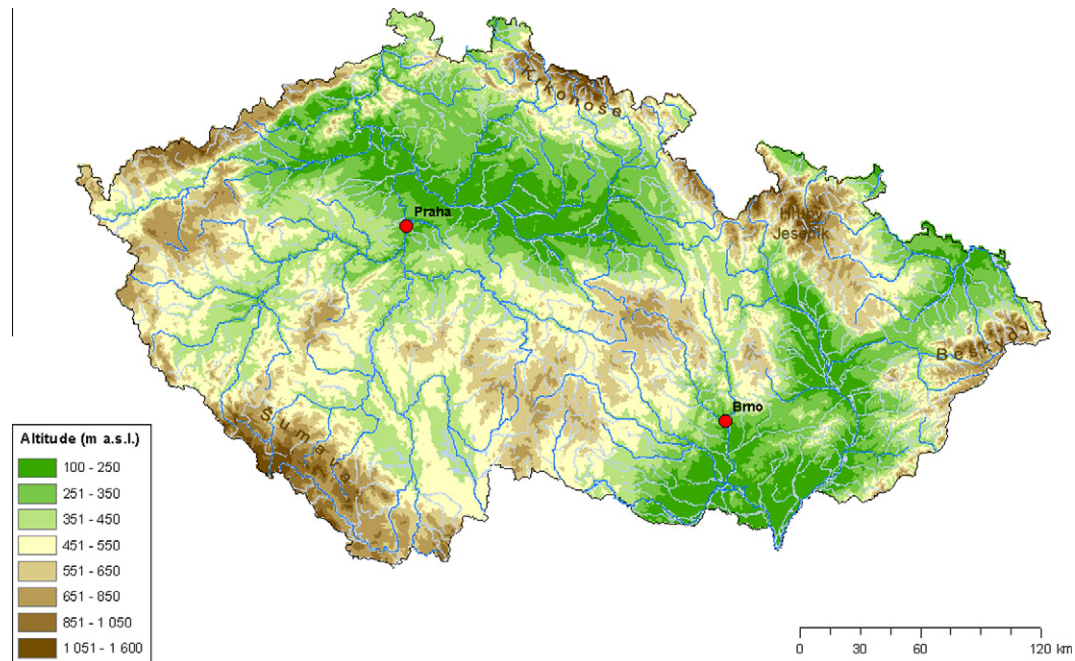


Fig. 1. Physical-geographical map of the Czech Republic.

and 17 °C. The mean annual number of summer days (a summer day is a day when the maximum temperature exceeded +25 °C) varies from less than 10 in the mountains to more than 60 in the largest lowlands which are located to the north of Praha and to the south of Brno.

The mean annual precipitation in the Czech Republic is 661 mm. The driest parts in the north-west and southeast of the country get less than 500 mm. The highest annual totals of over

1200 mm occur in the mountains such as Krkonoše Mts. and Šumava Mts. The wettest season is usually the summer while the winter is the driest. The average date of the first snow cover varies from late October in the mountains to early December in the lowest altitudes while the last occurs at the beginning of May and beginning of March, respectively (Tolasz et al., 2007).

The hydrographic network of the Czech Republic is relatively dense. The network is divided into three parts, which belong to

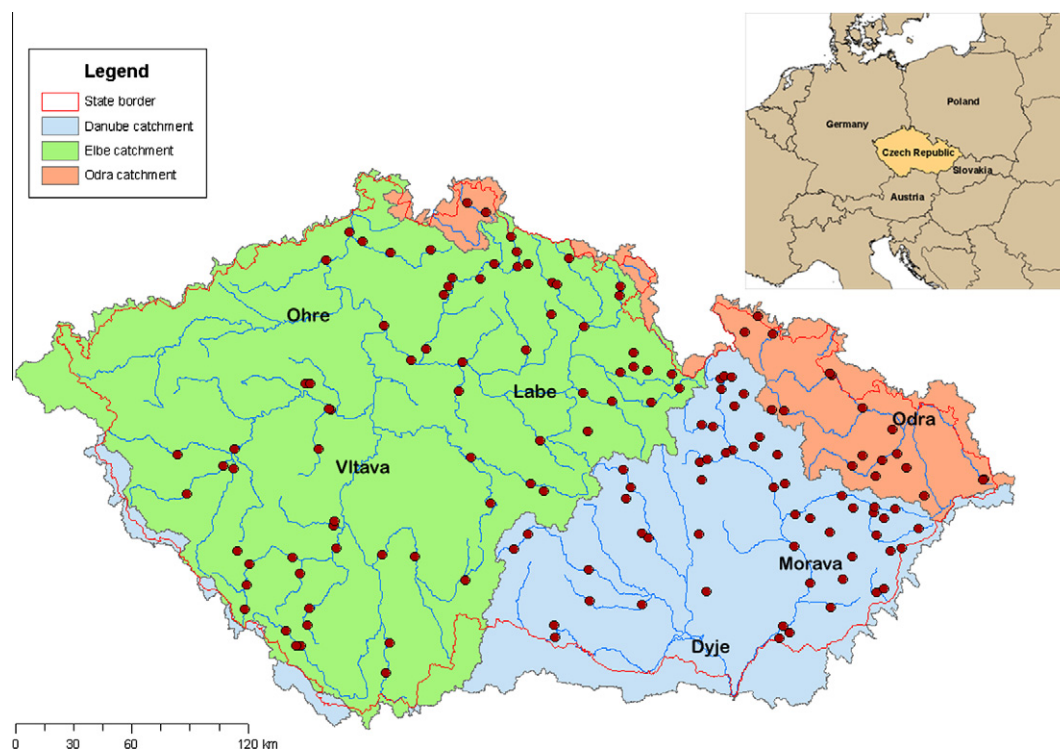


Fig. 2. Selected gauging stations and main catchments in the Czech Republic.

three different sea-drainage areas, following the three main European watershed divides (Fig. 2). The western part belongs to the Elbe basin, which drains water through Germany into the North Sea. The south-eastern part is drained by the Morava River into the Danube River which discharges into the Black Sea. The Odra River basin is in the northeast and its water flows to the Baltic Sea. Most of the streams spring in the Czech Republic and they flow out of the country. No major river flows into the country. Hence the water resources solely depend on precipitation. Due to the nature of the terrain, the lengthwise slope of the streams is relatively steep which accelerates the water runoff.

The network of stations used in this study is shown in Fig. 2. The stations are quite uniformly distributed across the Czech Republic with the exception of western part of the country (Ohře River basin) where suitable natural stations could not be selected due to the dense water dam network or to short records. Basin areas of the 144 stations range from 4.1 km² to 51123.3 km² while 50% of the basins are smaller or equal to 222 km². The station altitudes and mean basin altitudes range from 120 to 973 m a.s.l. and 296 to 1136 m a.s.l. respectively.

3. Methodology

3.1. Hydrological years

For hydrological purposes, mean annual discharges are calculated for years starting on November 1st and ending on October 31st. The autumn is a season of typically lower flows and there is hardly any snow in the mountains which is ideal for the annual water balance computation. The same approach is also used in several other European countries.

In this study, for drought variables, a more suitable delimitation of the hydrological year was applied. April 1st was selected as the beginning of the hydrological year for the computation of low-flow characteristics. Because March–April is a spring flood period, the delimitation ensures that one drought period does not get split into two different hydrological years. Thus, when talking about annual characteristics we refer to the hydrological year that begins on April 1st.

3.2. Low-flow variables

Five variables are used to evaluate trends in the low-flow regime of Czech rivers. One of these variables directly describes the low-flow discharge, two concern deficit volumes and two are numbers of days with discharge under a certain threshold (referred to in the text also as drought durations or drought days). The variables are:

- (1) Annual 7-day minimum discharge (“Q min”).
- (2) Annual number of days with discharge under Q_{330} (“D₃₃₀”).
- (3) Annual number of days with discharge under Q_{355} (“D₃₅₅”).
- (4) Annual number of deficit volume under Q_{330} (“V₃₃₀”).
- (5) Annual number of deficit volume under Q_{355} (“V₃₅₅”).

Annual 7-day minimum discharge (Q min) is the annual smallest mean daily discharge identified from a series of 7-day moving average discharges. Annual 7-day minimum discharges are studied not only quantitatively but also with regards to their dates of occurrence in a hydrological year (details in Section 3.3). The numbers of days with discharge under a certain threshold (D₃₃₀ and D₃₅₅) are used to evaluate annual durations of drought periods. The thresholds are discharges Q_{330} and Q_{355} . The subscript numbers of these indices refer to numbers of days in a year when mean daily discharge Q was equal or higher than the specific discharge.

For example the Q_{330} refers to mean daily discharge that was equalled or exceeded 330-times in a year. Hence it approximately equals percentile Q90.

At each station, the values of Q_{330} and Q_{355} were identified from the time series for each year of the studied period, that is 1961–2005. The averages of the Q_{330} and Q_{355} values are used as thresholds. Finally from each year the numbers of days with discharge under or equal to the averages of Q_{330} and Q_{355} values are derived. There may not be a single day with discharge under Q_{355} (or even Q_{330}) in a wet year and thus the D₃₅₅ (or even the D₃₃₀) would take the value zero. In a dry year the D₃₃₀ and D₃₅₅ may take the value 50 or more. Discharges Q_{330} and Q_{355} were selected because they are widely used in Czech water management and regulations. For example, the maximum allowance of liquid waste effluent dilution is estimated for the Q_{355} discharge.

The annual number of D₃₃₀ (as well as D₃₅₅) does not specify if there are only one or more drought periods during a year. It is simply the annual sum of days with mean daily discharge smaller than the selected threshold regardless of how many times the water level dropped under the threshold.

The deficit volumes are derived in the same manner for the same two thresholds and they are labelled V₃₃₀ and V₃₅₅. The volumes of each station are divided by the station's watershed area which allows for comparisons among stations with different flows, by removing the scale effect. It is possible to define other low-flow variables that can serve to study additional characteristics of the low-flow regime. Low flow quantiles corresponding to specific return periods of discharge, duration, or deficit (defined as the volume divided by the duration) have traditionally been used (Smakhtin, 2001; Ouarda et al., 2008). Future work can focus on the evolution of additional low-flow characteristics.

3.3. Low-flow seasons

For the evaluation of seasonal low-flow regimes, dates of occurrence of 7-day annual minimum flows are identified. From the frequency distribution of these dates two low-flow seasons, summer and winter, are preliminarily delimited. Further, polar plots are used for assessing the seasonality of the annual low flows. Twelve sectors of the circle correspond to the months of the year. In this method, individual dates of flood occurrence are defined as a directional variable, and then the directional mean and variance can be calculated. The Julian day of low flow occurrence (JD_i) can be converted to an angular value (θ_i) using equation:

$$\theta_i = JD_i \frac{2\pi}{ND}; \quad 0 \leq \theta_i \leq 2\pi \quad (1)$$

where ND is the number of days in a year ($ND = 365$ or 366 for a leap year).

Aside from the timing, the polar graph also displays the relative magnitude of each low flow. Concentric circles delimit the ratios of annual low flow values at a given station over the low flow with the highest value at this station. This makes the discharge values standardized and they range from 0 to 1. The smaller the ratio value (closer to the centre of the graph) the smaller the low-flow discharge. The biggest annual low flow equals 1. This form of standardization allows also for comparisons between stations. All stations can also be plotted in one graph to get an overview of the timing of low flows occurrence.

After investigating the frequency distribution, the polar graphs and the hydrographs, summer and winter low-flow seasons can be defined. According to the seasonality of the low flows at each site, stations were divided into two categories: mountain (G1) and lowland (G2). Category G1 stations are located in the mountains and their annual minima occurred at least 12 times in winter. Category G2 stations are located in the lowlands and their annual minima

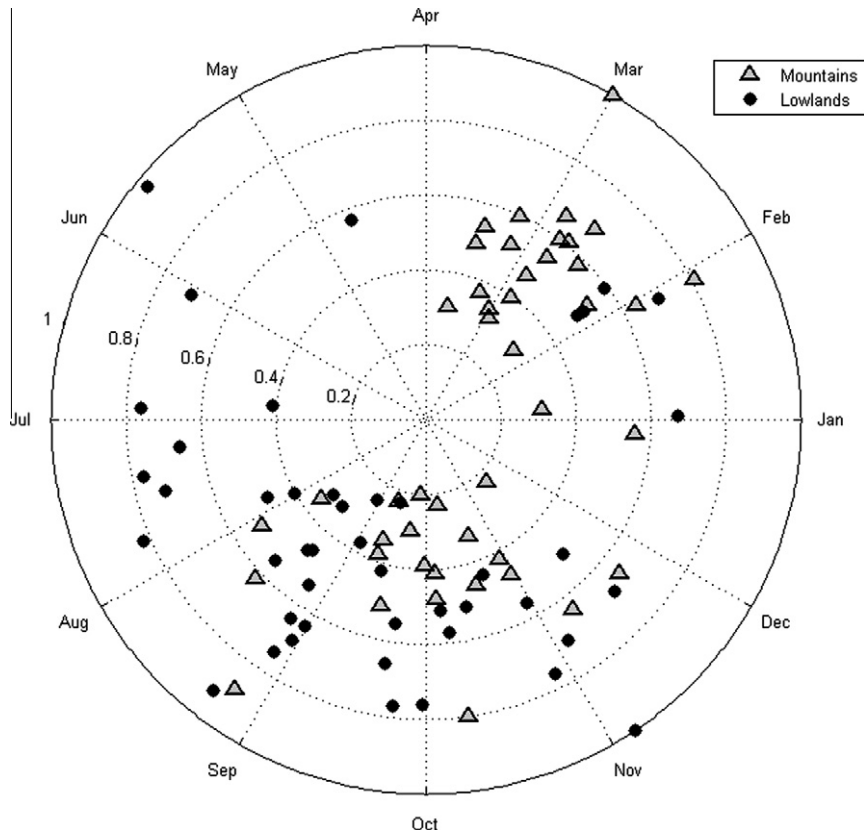


Fig. 3. Example of dates of occurrence of annual 7-day low flows at two stations belonging to G1 (Mountain) and G2 (Lowland) group.

occur mostly in the summer. A typical distribution of low flows at a G1 and a G2 station is shown in a polar graph in Fig. 3.

3.4. Statistical methods

For trend detection the non-parametric Mann–Kendall (MK) trend test (Kendall, 1975) is considered in this study. Hydrological data are often non-normally distributed and in such case using a non-parametric statistical test (in comparison to parametric tests) is considered to be more suitable. The null and alternative hypotheses for the MK test are respectively:

$$H_0 : \text{Prob} [x_j > x_i] = 0.5 \text{ where } j > i.$$

$$H_A : \text{Prob} [x_j > x_i] \neq 0.5 \text{ (two-sided test).}$$

Secondly, the MK test statistic S is computed as:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

where x_j and x_i are the data values for periods j and i (e.g. months or years), with $j > i$, and $\text{sgn}(x_j - x_i)$ is the sign function:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

For large sample sizes n , the distribution of the S statistic can be approximated by a normal distribution. When some data values are tied, the correction to $\text{Var}(S)$ is:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n (i(i-1)(2i+5))}{18} \quad (4)$$

Then, standard normal test statistic Z_S for testing the hypothesis is:

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_S} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_S} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Finally, the significance levels (p -values) for the trend test are computed from:

$$p = 2 * [1 - \text{normcdf}(k, 0, 1)] \quad (6)$$

where

$$k = \text{abs}(Z_S) \quad (7)$$

The trend is unlikely to be caused by random sampling if the p -value is small enough. For example if $p \leq 0.05$, then at the significance level of 0.05 the trend is assessed to be statistically significant.

The basic MK test is affected by the autocorrelation structure of the time series. If a time series is positively autocorrelated, then a significant trend is suggested more often compared to an independent series (von Storch, 1995). Various versions of the MK test have been suggested in the literature to take into consideration the autocorrelation in the time series.

A conservative version of the modified MK test was selected for this study. The modified MK test first computes the autocorrelation coefficient and if it is significant at a selected significance level, it removes the autocorrelation before the MK test is applied.

The removal of the autocorrelations begins with the calculation of the autocorrelation:

$$r1 = \frac{(\sum_{j=1}^n (x(1:n-j) - \text{mean}(x)))' * (x(1+j:n) - \text{mean}(x))}{(n-j) * \text{var}(x)} \quad (8)$$

where

$$j = 1 \quad (9)$$

The upper and lower limits of the confidence interval are defined as follows:

$$\text{Down} = (-1 - 1.645 * \sqrt{(n-2)/(n-1)}) \quad (10)$$

$$\text{Up} = (-1 + 1.645 * \sqrt{(n-2)/(n-1)}) \quad (11)$$

The process continues with the calculation of the coefficient:

$$\text{coef} = 1 + 2 * ((r1^{(n+1)} - n * r1^2 + (n-1) * r1) / (n * ((r1-1)^2))) \quad (12)$$

The autocorrelation is significant if $r1$ is smaller than the lower limit (formula (10)) or greater than the upper limit (formula (11)). If so, following corrections are applied:

$$Z2 = Z / \sqrt{(\text{coef})} \quad (13)$$

$$k2 = \text{abs}(Z) / \sqrt{(\text{coef})} \quad (14)$$

$$p\text{value } 2 = 2 * (1 - \text{normcdf}(k2, 0, 1)) \quad (15)$$

$k2$ modifies the standard normal variate and p -value 2 is the modified p -value. In case the autocorrelation is not significant, standard p -value (Eq. (6)) is used.

Other methods that deal with the problem of autocorrelation have been presented in the literature and are described for example in Khaliq et al. (2008). In this study, results are presented for both standard and modified MK test. The significance levels of 5% and 10% are used to assess the significance of the trend in this study.

4. Results

4.1. Seasonality of low flows

Dates of occurrence of 7-day annual minimum flows are used to evaluate the seasonality of low flows. Fig. 4 illustrates the frequency distribution of these dates. It indicates that the main low flow season is summer (most frequently the month of August). A relatively small peak in the frequency curve occurs in January and represents the occurrence of annual minima during the winter season. Summer low flows are caused by lack of precipitation and high temperatures. Winter low flows occur due to river freeze-up and precipitation stored as snow. The climate of the basins is mostly driven by the basin altitude. Generally, the higher the altitude, the colder the climate and hence the more frequent the winter minima caused by the river freeze-up. Thus at mountain stations, occurrences of lowest flows during the winter period are relatively common.

Low-flow seasonality was also assessed by plotting the polar graphs. To get an overall picture, standardized annual minima of all 144 stations were plotted in one graph that is shown in Fig. 5. It is observed that in spring time, specifically from mid-March until the end of May, low flows are very rare since this is typically the spring flood season. Most low flows occur between the end of July and the end of October. From mid-January to mid-March there is another increase in the concentration of low flows representing the mountain stations winter low flows. The polar graph displays also the magnitudes of low flows using the methodology described in Section 3.3. It can be seen that most of the lowest values occur during the summer period. The winter minima are more uniformly spread and less intense than annual 7-day minima that occur in the summer.

Based on these results, summer and winter low-flow seasons are generally defined as follows: Summer and winter seasons fall

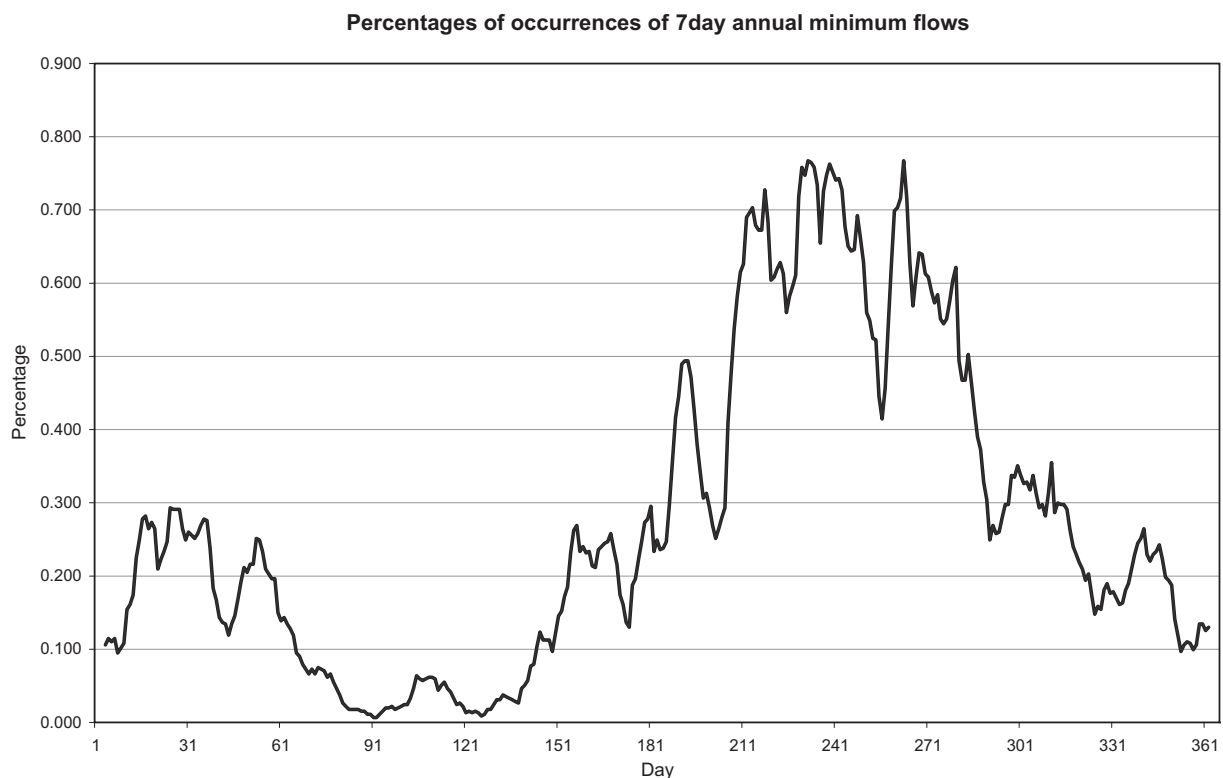


Fig. 4. Relative frequencies of occurrences of 7-day annual minimum flows observed at 144 stations during the period 1961–2005 (6480 station years). Day 1 means January 1.

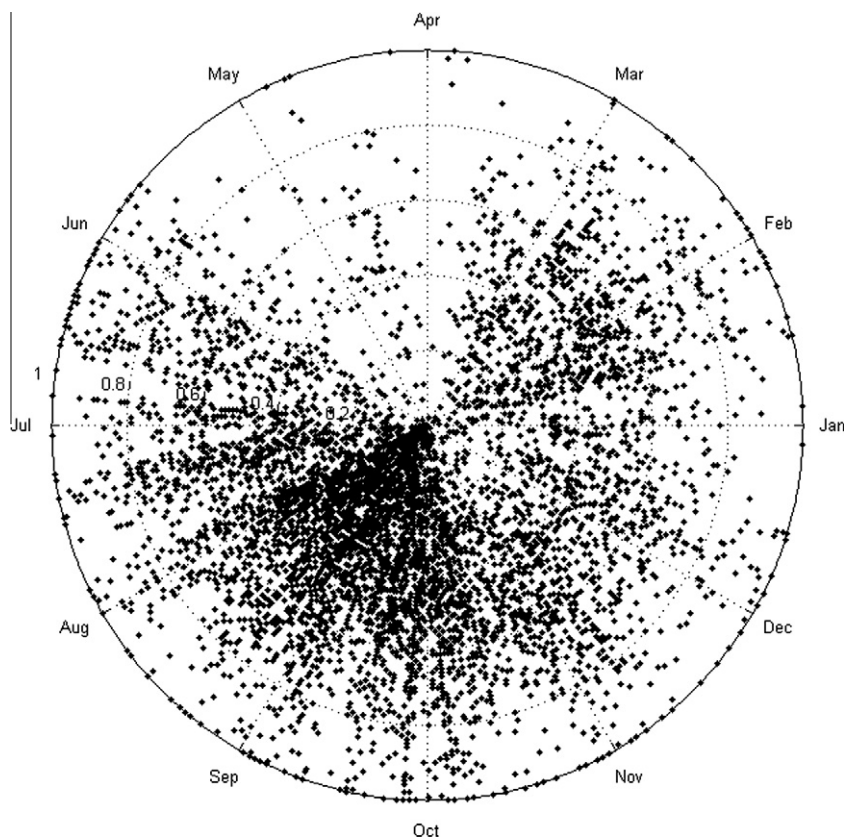


Fig. 5. Polar plot with dates of occurrence of annual 7-day low flows at all stations used in the study.

within the April to November and December to March periods, respectively. However, low-flow seasonality depends on a number of physiographic characteristics, the most important of which is altitude. Consequently, in a few cases and after close inspection, November and April minima at mountain stations were allocated to the winter season. On the other hand a few December minima at lowland stations were designated as summer minima.

It is absolutely necessary to evaluate the low flows separately for summer and winter seasons. Imagine a mountainous river with deep freeze-up causing the annual lowest flow in winter and a relatively higher summer minimum. With a climate change bringing for example a rise in temperature, the river would not freeze so much and thus winter – and at the same time annual – minima would grow. At the same time, the change would probably cause a drop in summer low flows, however, those would be overlooked in the list of annual minima and a drought-prone summer tendency might not be identified soon.

The stations were divided into two categories: mountain (G1) and lowland (G2). G1 stations are located in the mountains and highlands and their mean basin altitude is in most cases above 600 m a.s.l. On average 36% of the annual minima occurred at these stations during the winter season with a maximum of 55%. The G2 stations spread across the whole country in mid-altitudes and lowlands. Their mean basin altitudes range from 300 to 900 m a.s.l. In these basins, annual minima occur during the summer. Winter minima at G2 stations are rare and were observed on average in 13.5% of the cases.

4.2. Trends in annual 7-day low flows

4.2.1. Trends in 7-day low-flow discharges

7-day minimum discharges were treated on an annual basis and separately for the summer and the winter. The percentage of G1

and G2 stations with respective trends and significance levels in time series of low flows and in their dates of occurrence is shown in Table 1.

Stations with significant trends of 7-day annual low flows show similar spatial distribution as in the case of summer low flows. This is the case because most of the annual low flows are observed in the summer (81% on average) and hence the results of the trends are similar. However, evaluating annual minima mixes two different natural phenomena with winter low flows caused by freeze-up and summer low flows caused by high temperatures and the lack of precipitation. That is why summer and winter minima were tested separately. Summer minima were tested for all stations, winter minima only for G1 stations. The same approach was used for testing the shifts in the dates of summer and winter minima.

Table 1

Percentage of G1 and G2 stations with trends and significance levels observed in series of 7-day annual (Q min), summer (QS min) and winter (QW min) low flows and in series of summer (S date) and winter (W date) low flow dates (%) (results according to modified Mann-Kendall test).

Trend	Q min	QS min	S date	QW min	W date
<i>Mountainous stations (Group 1)</i>					
Increasing (0.05)	0.0	2.7	0.0	8.1	0.0
Increasing (0.1)	2.7	0.0	0.0	2.7	0.0
Not significant	83.8	81.1	91.9	86.5	94.6
Decreasing (0.1)	13.5	10.8	0.0	0.0	2.7
Decreasing (0.05)	0.0	5.4	8.1	2.7	2.7
<i>Lowland stations (Group 2)</i>					
Increasing (0.05)	0.0	0.0	0.0		
Increasing (0.1)	0.9	0.0	0.9		
Not significant	91.6	90.7	89.7		
Decreasing (0.1)	3.7	4.7	4.7		
Decreasing (0.05)	3.7	4.7	4.7		

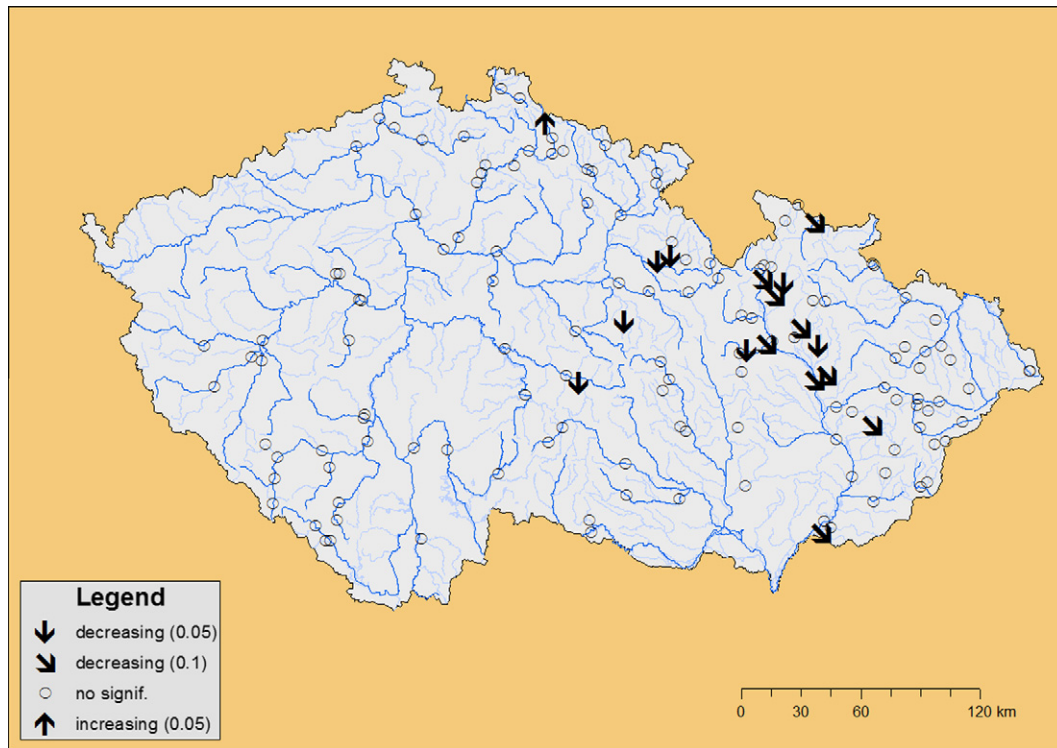


Fig. 6. Trends in 7-day summer minimum discharges (1961–2005, modified MK test).

Spatial distribution of time trends in summer low flows is shown in Fig. 6. Significant trends are observed at only 12% of the stations. Although not abundant in number, stations with significant trends clearly show a spatial dependence. Negative trends are observed in the upper Morava River basin and at a few rivers located to the west of this basin and at the left tributaries of the Elbe River. About half of the negative trends is significant at the 5% level and the rest at the 10% significance level. There is only one station with a significant positive trend and it is located in the northern part of the country.

Stations with significant winter low flows represent 14% of all G1 stations. Most of the significant trends are positive which means that winter low flows increase (not shown). Only one station exhibits a negative trend. All of the stations with increasing trends are in the high mountains. It is then possible to link these trends with warming winters when more precipitation falls as rain and more direct runoff is generated.

Table 2

Percentage of stations with observed trends in series of 7-day annual (Q min), summer (QS min) and winter (QW min) low flows and in series of summer (S date) and winter (W date) low flow dates (%). Comparison of standard and modified MK test.

Trend	Q min	QS min	S date	QW min	W date
<i>Mann–Kendall test</i>					
Increasing (0.05)	2.8	1.4	0.0	8.1	0.0
Increasing (0.1)	3.5	0.0	0.7	2.7	0.0
Not significant	77.1	73.6	91.0	83.8	94.6
Decreasing (0.1)	2.8	6.3	2.8	2.7	2.7
Decreasing (0.05)	13.9	18.8	5.6	2.7	2.7
<i>Modified Mann–Kendall test</i>					
Increasing (0.05)	0.0	0.7	0.0	8.1	0.0
Increasing (0.1)	1.4	0.0	0.7	2.7	0.0
Not significant	89.6	88.2	90.3	86.5	94.6
Decreasing (0.1)	6.3	6.3	3.5	0.0	2.7
Decreasing (0.05)	2.8	4.9	5.6	2.7	2.7

4.2.2. Trends in 7-day low flow dates

Low flow dates were tested to evaluate how the timing of seasonal low flows is evolving. It was suspected that, with warmer winters, spring floods would occur earlier and summer droughts might shift to earlier dates as well. Hence dates of summer minima at all stations and dates of winter minima at G1 stations were tested for date shifts. It can be seen from Table 2 that significant trends of summer low flow dates are observed at 9.7% of stations and they are mostly negative with only 0.7% of increasing trends. Negative trends mean that the dates of occurrence of low flows are shifting earlier in the year. Fig. 7 illustrates an example of a station where summer minima are occurring earlier in the year. The entire period was split into two sub-periods 1961–1983 and 1984–2005. The split was done to have the sub-periods of similar lengths and to demonstrate different timing when minima were observed in different periods. It is obvious that most of the minima in the 1961–1983 period occurred in August–October while in the more recent period 1984–2005 they occurred in June–September.

Shifts in winter low flow dates were tested for G1 stations. Results show that these dates do not shift. Significant trends are observed at only two stations. In both of these stations trends are decreasing.

Trends of summer low flow dates, annual and summer minimum discharges are similar at G1 and G2 stations. Therefore it can be stated that the development of the low-flow variables used in this study and the ratios of significant trends are irrespective of the basin altitudes and climates.

A comparison of trend results of the standard and modified MK test is shown in Table 2. The results of the modified MK test naturally contain smaller percentages of significant trends. This is true in all cases except for summer date shifts where there is one station showing no trend with the standard MK but having a negative trend with a 10% significance level with the modified MK. Trends of winter date shifts are exactly the same for all stations. On the other hand, the modified version of the MK test reduce the percentage of

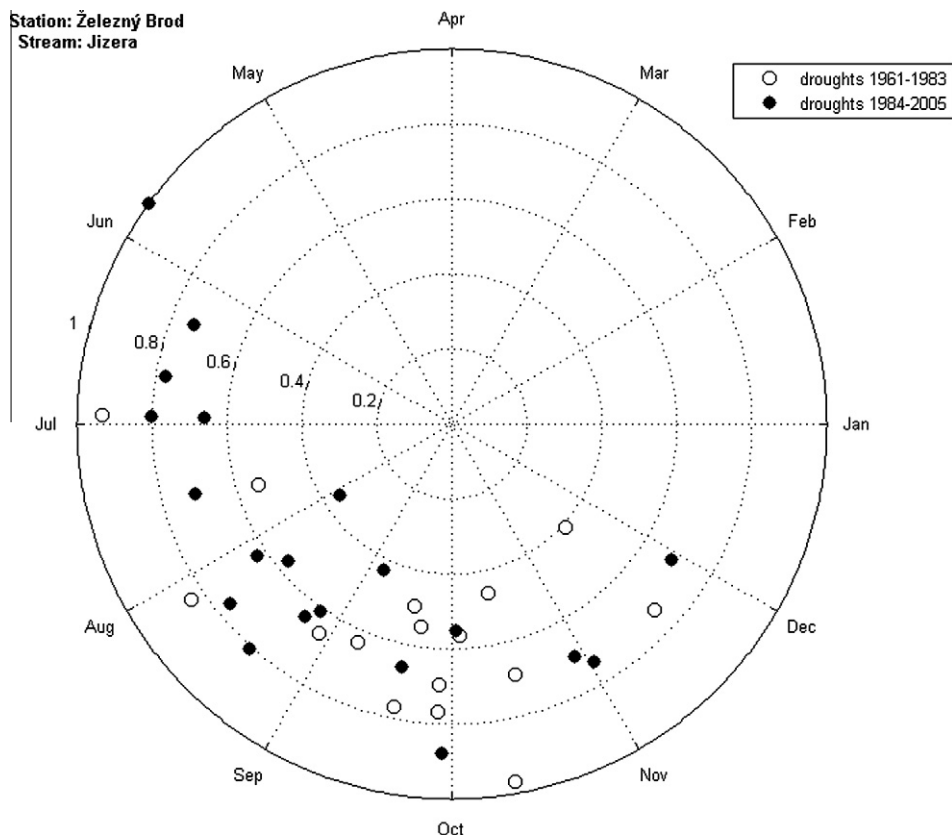


Fig. 7. Annual occurrences of 7-day low flows at Železný Brod gauging station (Jizera River) in two different time periods.

significant trends in annual, summer and winter low flows by 54%, 55% and 17% respectively.

4.3. Trends in deficit volumes and days under a certain threshold

Thresholds Q_{330} and Q_{355} were used to derive annual numbers of deficit volumes (V_{330} and V_{355}) and drought durations (D_{330} and D_{355}). The annual numbers represent annual sums of the days and volumes. It is not specified how many periods with discharge under Q_{330} and Q_{355} occurred each year. Fig. 8 shows the spatial distribution of trends in V_{330} (Fig. 8a) and D_{330} (Fig. 8b). Trends in D_{330} are insignificant at 91% of the cases. Among significant trends, increases prevail and most of them are observed in the Morava River basin and the upper Elbe River basin. Generally, stations with increasing trends in D_{330} have also decreasing trends of low-flow discharges (e.g. the 7-day summer minimum), which was expected.

Fifteen percent of trends in deficit volumes V_{330} are significant and most are increasing. The majority of increases occur in rivers where increases of D_{330} are observed. There are a few stations with decreasing deficit volumes and they are concentrated in the northern part of the country. This is the same region where the only two stations with decreasing D_{330} are located. Fig. 8a and b indicates that significant trends in V_{330} and D_{330} are not frequent. They also show that positive trends are mainly located in the central-eastern part and negative trends in the north-western part of the Czech Republic.

Among the significant trends, increasing deficit volumes V_{330} and drought durations D_{330} prevail. This indicates that in periods of drought, water levels drop under the Q_{330} threshold for longer periods and also to lower levels. Hence it may be expected that they hit the Q_{355} level more often. Trends in annual numbers of

days with discharge under Q_{355} (D_{355}) and trends in deficit volumes under Q_{355} (V_{355}) were studied and are presented in Fig. 9. The percentage of significant trends is higher for V_{355} and D_{355} than for V_{330} and D_{330} . In most cases, trends in V_{355} (Fig. 9a) are consistent with trends in D_{355} (Fig. 9b). In this case also, increases dominate the significant trends for both V_{355} and D_{355} and their spatial distributions correspond to the distributions of V_{330} and D_{330} trends. Increases are typical for the eastern part of the country especially the Morava River basin and the adjacent basins of the Elbe River tributaries. A considerable number of significant decreases is also observed in the north-west and in other basins across the western part of the country.

The percentage of trends obtained by the standard and modified MK tests are shown in Table 3. Again, the modified MK test eliminated some of the significant trends that were obtained with the standard version of the test. The number of eliminated trends varies with the variables being studied. Significant trends in drought durations D_{330} were reduced by 55%. On the other hand results for deficit volumes V_{330} remain the same. In few cases, the modified MK test indicates higher percentages of significant trends for the 10% level than the standard MK test. This is caused by a number of stations which showed a significance level of 5% with the standard test but dropped to the 10% level with the modified test.

5. Discussion

This study deals with trends in low flows in Czech rivers, their temporal evolution, spatial distribution and shifts of dates when low flows are observed. It is shown that annual low flows usually occur in the summer. A typical course of water levels in Czech rivers starts with a spring flood followed by a recession and the minimum occurs at the end of the summer. Discharges increase with

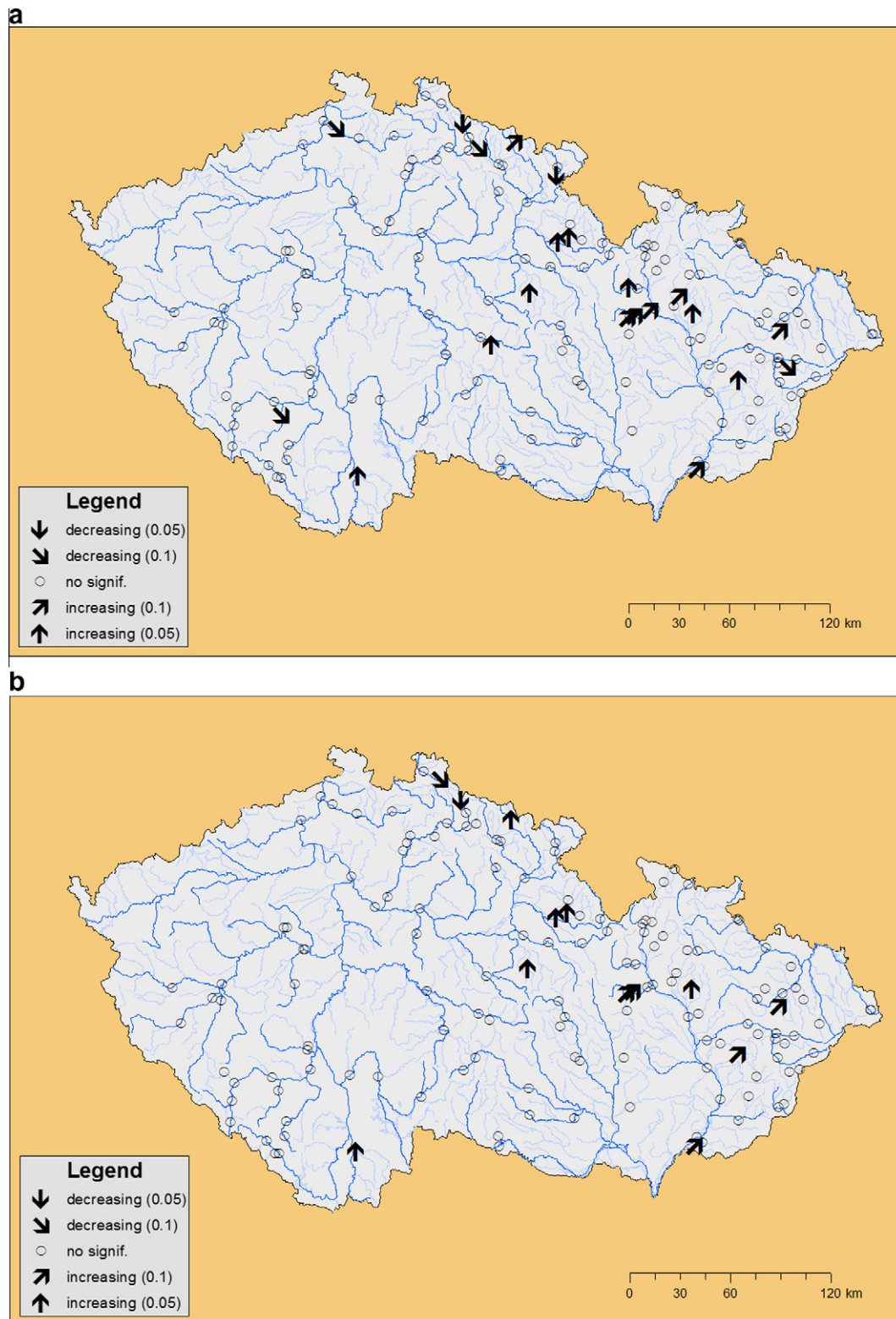


Fig. 8. Trends of annual deficit volumes V_{330} (a) and trends of annual numbers of drought durations D_{330} (b) (modified MK test).

autumn cooling and rain showers and they stay at a certain level until the spring flood raises the levels again. In the mountain regions, however, climate is cooler and more humid. Summer minima may not drop so low. On the other hand streams can freeze-up and more precipitation is stored as snow pack during the winter which can result in a very low flow. In such a situation, winter min-

ima are smaller than summer minima, and thus, the annual low flow occurs during the winter.

Generally, the higher the basin altitude the higher the number of annual minima caused by freeze-up in winter rather than by the lack of precipitation and high temperatures in summer. There are a few examples of lowland stations with zero winter minima

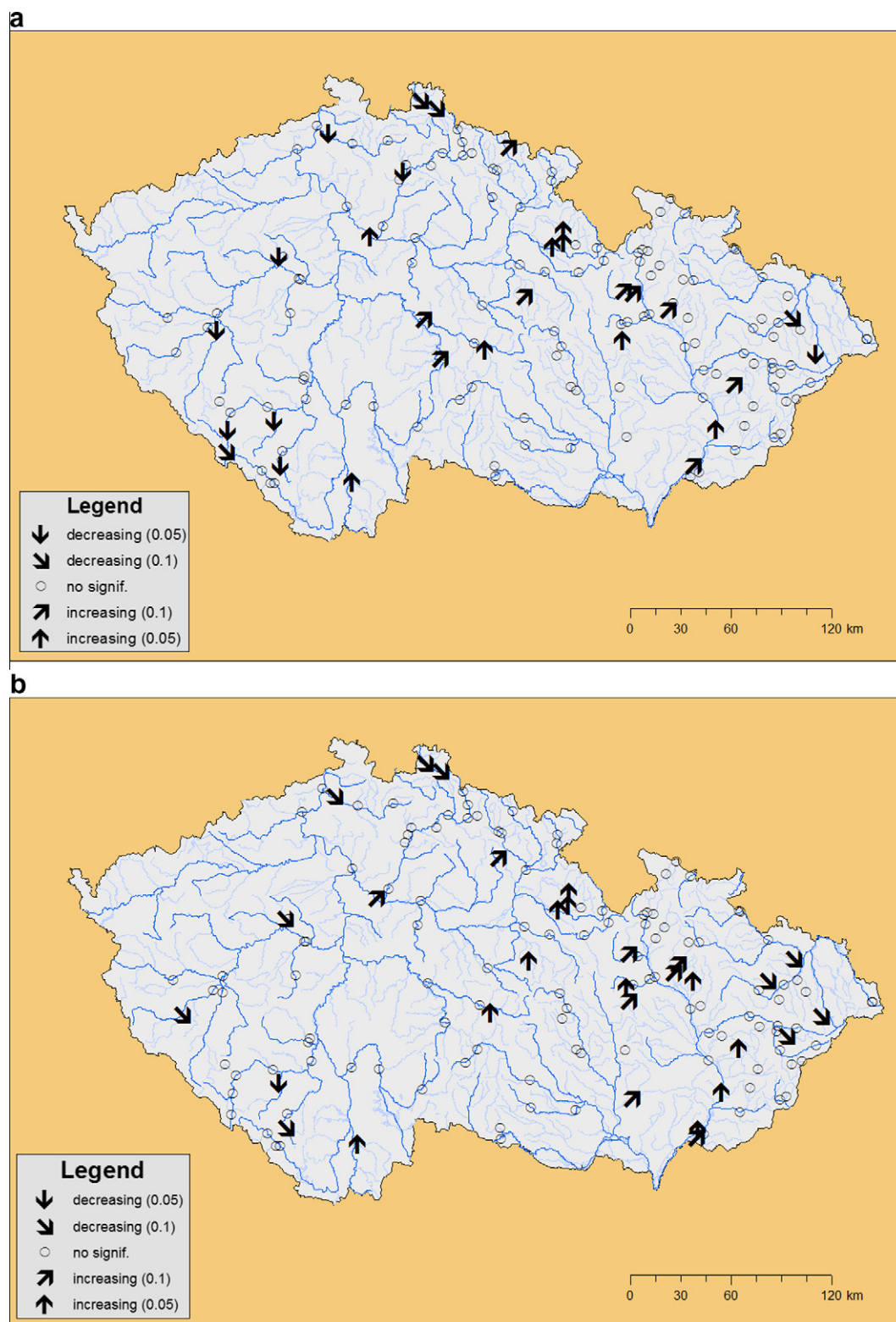


Fig. 9. Trends of annual deficit volumes V_{355} (a) and trends of annual numbers of drought durations D_{355} (b) (modified MK test).

and on the other side mountain stations with similar numbers of winter and summer minima for the studied period. Thus, to prevent mixing the seasonal distributions caused by two different mechanisms, summer and winter low flows were studied separately. Since there is a very small number of winter minima at lowland stations (G2 group), they were studied only at mountain stations (G1 group).

Within significant trends, generally, low-flow discharges decrease and deficit volumes and numbers of drought days increase. Although not high in number, stations with these trends concentrate in the eastern part of the Czech Republic, more specifically the Upper Morava River basin and the nearby left tributaries of the Elbe River. This is an area where also many mean monthly discharges exhibit a downward trend. From July to December

Table 3

Percentage of stations with observed trends in series of drought days D_{330} and D_{355} and deficit volumes V_{330} and V_{355} (%). Comparison of standard and modified MK test.

Trend	D_{330}	V_{330}	D_{355}	V_{355}
<i>Mann–Kendall test</i>				
Increasing (0.05)	11.8	5.6	14.6	10.4
Increasing (0.1)	2.8	4.9	4.9	6.3
Not significant	79.9	85.4	70.1	72.9
Decreasing (0.1)	2.8	2.8	2.8	1.4
Decreasing (0.05)	2.8	1.4	7.6	9.0
<i>Modified Mann–Kendall test</i>				
Increasing (0.05)	4.2	5.6	7.6	5.6
Increasing (0.1)	3.5	4.9	5.6	6.3
Not significant	91.0	85.4	79.2	79.9
Decreasing (0.1)	0.7	2.8	6.9	2.8
Decreasing (0.05)	0.7	1.4	0.7	5.6

decreasing trends of monthly flows are observed almost solely in this part of the country.

Trends in 7-day summer and winter low flows are in most cases statistically insignificant. Within significant summer low flow trends, decreases prevail and they concentrate in the area mentioned above. They correspond to downward trends in mean monthly flows in the summer period. These flow trends may be explained by the unchanging precipitation depths and the rising mean and maximum temperatures of summer months that were observed over the period 1961–2005 by Brázdil et al. (2008). It is necessary to emphasize that this attribution is only qualitative.

Very few winter minima show a significant trend, but when it is the case, they are increasing. Only at one station the trend is decreasing. All stations with upward winter low flow trends have watershed altitudes above 700 m a.s.l. One probable explanation of these increasing trends is the warming during winter months. With warmer winters, less precipitation falls as snow, more precipitation falls as rain and winter flows increase. No quantitative analysis has been carried out and further research could focus on this

topic. The results presented above are also supported by mean winter discharges in Czech rivers. Increasing trends are observed in Czech rivers mean discharges for the months of January–March and most of the stations with significant trends are located in the mountainous regions. Fig. 10 illustrates trends in mean March flows in Czech rivers.

Trends in deficit volumes and numbers of days with low flows were also studied. Two thresholds, Q_{330} and Q_{355} , were selected because of their importance for Czech water management practice. Q_{330} is a mean daily discharge that is equalled or exceeded 330 times in a year. Thus, it is similar to the Q90 percentile. Q_{355} approximately equals Q97. The proportion and spatial distribution of stations with significant trends in drought days D_{330} are similar to the trends of deficit volumes for V_{330} . Trends for these two variables are identical at most stations. No stations display opposite trends in these two variables. Results show that the Upper Morava River basin is a drought-prone part of the country where trends towards longer and more severe hydrological droughts are observed.

Stations with increasing deficit volumes V_{330} display similar trends for V_{355} . At most stations trends in these two variables are similar. A similar behaviour is observed for trends in drought durations D_{355} . These trends are mainly upwards and are observed at stations where increasing trends of deficit volumes V_{330} and V_{355} are detected. Periods with flows below the Q_{355} discharge are generally not common but the results suggest that recently they tend to be longer and more severe in a considerable number of basins. If these trends persist, the situation may become problematic for the Czech water management. However, several streams in the western part of the country display the opposite behaviour. Further research to investigate the cause for this behaviour is recommended.

The study focused also on the dates of low flow occurrence. For the stations and for the period of study, the overall average date of summer 7-day low flows is August 28th. The first low flows occur in July at small lowland watersheds in the Elbe River basin. Most frequently the summer minima occur in August and in the beginning of September. The same timing was observed for annual

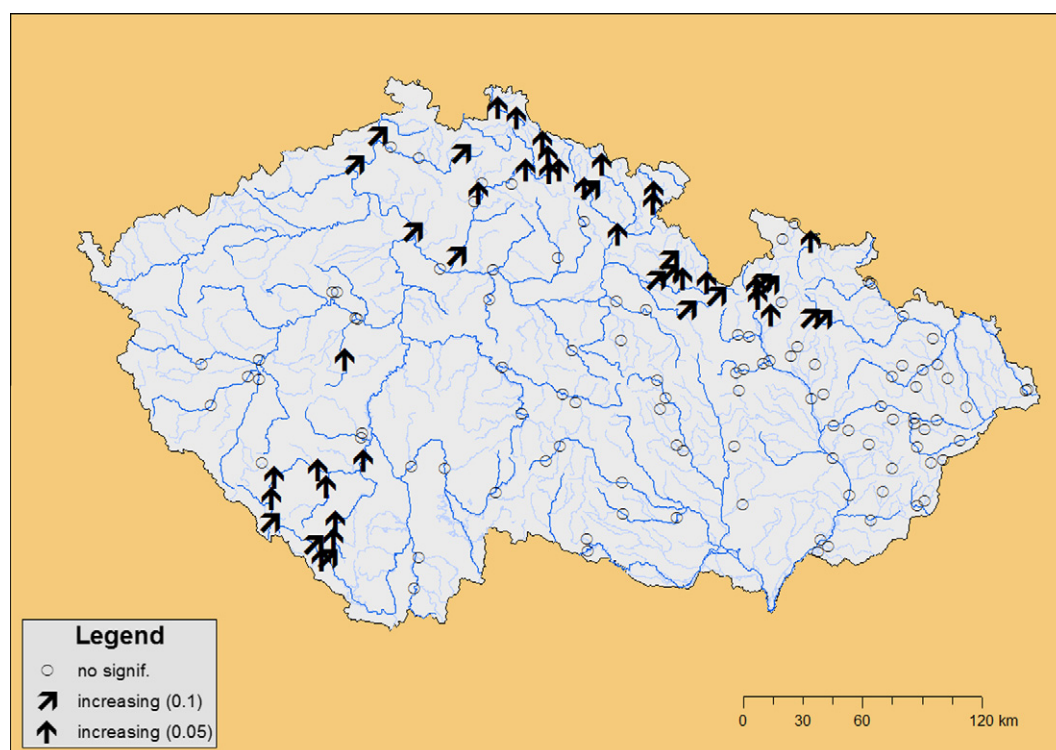


Fig. 10. Trends in mean March discharges (modified MK test).

30-day low flows in Lithuanian rivers by Kriauciuniene et al. (2007). The latest summer low flows in Czech rivers occur in the second half of September and are observed at mountain basins where the spring flood and recession also occur later. For G1 stations the average date of winter low flows is January 25th. The time span of winter minima occurrence is from January 4th to February 20th which coincides with the period of lowest temperatures.

Dates at each station were tested to study the evolution of the timing of seasonal low flows. With earlier recessions and with the observed insignificant trend towards a rise in autumn precipitations (Brázdil et al., 2008), summer droughts might shift to earlier dates as well. This was confirmed by the results but the shifts are not severe. Significant trends were observed at 10% of the stations and in 93% of the cases the shift is towards earlier dates. Stations with significant shifts do not cluster in one small area as it is the case with stations with significant discharge trends. Unlike the summer minima, winter low flows do not exhibit significant shifts in the dates of occurrence.

The modified MK test results show a smaller percentage of significant trends than the standard MK test. Trends in summer low flows and drought durations D_{330} were reduced severely with the modified MK test (less than 50% of the significant trends were retained). On the other hand no change was observed for deficit volumes V_{330} and dates of shifts for winter low flows.

Results indicate that the north-eastern part of the Czech Republic is a drought-prone area. Downward trends in mean monthly discharges are observed from May to December. 7-day summer low flows are also decreasing while drought durations and deficit volumes are increasing. Trends display clear spatial patterns. The basin altitude and thus the ratio of summer and winter minima do not seem to play an important role. Only trends in winter mean flows are linked to altitude when significant increases are observed at mountain stations.

All of the results and conclusions are based on trends at individual water-gauging stations. The series were tested for trend at 5% and 10% significance, so one can expect 5% and 10% of the series, respectively, to be significant only by chance. This means that some of the values are not field significant. Field significance, spatial correlation and influences of various physical-geographical conditions on the trends are currently being examined.

Acknowledgements

The financial support provided by the National Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Mobility Fund of the Charles University in Prague is gratefully acknowledged. Special thanks are also due to the Department of Hydrofond and Balances (CHMI Prague) for the purchase of the data. The authors wish to thank Petr Šercl (CHMI Prague), and Christian Charron and Hadiza Moussa Saley (INRS-ETE) for their assistance.

References

- Blenkinsop, S., Fowler, H.J., 2007. Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *Int. J. Climatol.* 27, 1595–1610.
- Brázdil, R., Chromá, K., Dobrovolný, P., Tolasz, R., 2008. Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961–2005. *Int. J. Climatol.* 29, 223–242.
- Brilly, M., 2007. Climate change impact on mean annual river flows. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, Helsinki, Finland, pp. 82–87. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Mangianti, F., Maugeri, M., Nanni, T., 2004. Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global Planet. Change* 40, 141–149.
- Buchtele, J., Buchtelová, M., Fořtová, M., Dubrovský, M., 1999. Runoff changes in Czech river basins – the outputs of rainfall–runoff simulations using different climate change scenarios. *J. Hydrol. Hydromech.* 47 (3), 180–194.
- Čunderlík, J., Hlavčová, K., Szolgay, J., 1998. Vplyv klimatickej zmeny na vnútročné rozdelenie odtoku vo vybraných povodiach Slovenska. *J. Hydrol. Hydromech.* 45 (2), 114–143.
- Danihilik, R., Hlavčová, K., Kohnová, S., Parajka, J., Szolgay, J., 2004. Scenarios of the change in the mean annual and monthly runoff in the Hron Basin. *J. Hydrol. Hydromech.* 52 (4), 291–302.
- Dankers, R., Feyen, L., Kalas, M., Christensen, O.B., de Roo, A., 2007. Future changes in flood hazard in Europe. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, Helsinki, Finland, pp. 115–120. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Degirmendžić, J., Kozuchowski, K., Zmudzka, E., 2004. Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951–2000 and their relationship to atmospheric circulation. *Int. J. Climatol.* 24, 291–310.
- Domonkos, P., 2003. Recent precipitation trends in Hungary in the context of larger scale climatic changes. *Nat. Hazards* 29, 255–271.
- Fiala, T., 2008. Statistical characteristics and trends of mean discharges of period 1961–2005. *J. Hydrol. Hydromech.* 56 (2), 133–140.
- Hisdal, H., Holmqvist, E., Jónsdóttir, J.F., Jónsson, P., Järvet, A., Lindström, G., Kolcova, T., Kriauciuniene, J., Kuusisto, E., Lizuma, L., Meilutyte-Barauskiene, D., Reihan, A., Roald, L.A., 2007. Climate change signals in streamflow data in the Nordic and Baltic region. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, Helsinki, Finland, pp. 182–187. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Hladný, J. (Ed.), 1996. Dopady možné změny klimatu na hydrologii a vodní zdroje v České republice. Report of National Climatic Programme, vol. 20, Czech Hydrometeorological Institute, Prague, 80pp.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Summary for Policymakers. <<http://www.ipcc.ch>>.
- Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London.
- Khalik, M.N., Ouara, T.B.M.J., Gachon, P., Sushama, L., 2008. Temporal evolution of low-flow regimes in Canadian rivers. *Water Resour. Res.* 44, W08436. doi:10.1029/2007WR006132.
- Klavins, M., Rodinov, V., 2007. Long term changes of hydrological processes in inland waters of Latvia. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, Helsinki, Finland, pp. 239–244. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Korhonen, J., 2007. Long-term discharge trends in Finland. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, Helsinki, Finland, pp. 245–250. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Kriauciuniene, J., Kovaneckiene, M., Meilutyte-Barauskiene, D., 2007. Changes of the dry period runoff in Lithuania. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, Helsinki, Finland, pp. 314–319. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Krysanova, V., Hattermann, F., Habeck, A., 2005. Expected changes in water resources availability and water quality with respect to climate change in the Elbe River basin (Germany). *Nord Hydrol.* 36 (4–5), 321–333.
- Krysanova, V., Vetter, T., Hattermann, F., 2008. Detection of change in drought frequency in the Elbe basin: comparison of three methods. *Hydrolog. Sci. J.* 53, 518–537.
- Majerčáková, O., Škoda, P., Šťastný, P., Fasko, P., 2004. Vývoj zložiek hydrologickej bilancie za obdobia 1931–1980 a 1961–2000. *J. Hydrol. Hydromech.* 52 (4), 355–364.
- Majerčáková, O., Fendeková, M., Lešková, D., 1997. The variability of hydrological series due to extreme climatic conditions and the possible change of the hydrological characteristics with respect to potential climate change. In: Gustard, A., Blažková, Š., Brilly, M., Demuth, S., Dixon, J., van Lanen, H., Llasat, C., Mkhandji, S., Servat, E. (Eds.), *FRIEND'97 – Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management*, pp. 59–66 (IAHS Publication No. 246).
- Miklášek, P., Pekárová, P., Pekár, J., Škoda, P., 2007. Regionalisation of Slovak rivers with respect to climate change in 1930–2005 and their sensitivity to QBO and NAO phenomena. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, Helsinki, Finland, pp. 326–331. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Ouarda, T.B.M.J., Charron, C., St-Hilaire, A., 2008. Statistical models and the estimation of low flows. *Can. Water Resour. J.* 33 (2), 195–206.
- Piccarreta, M., Capolongo, D., Boenzi, F., 2004. Trend analysis of precipitation and drought in Basilicata from 1923 to 2000 within a Southern Italy context. *Int. J. Climatol.* 24, 907–922.
- Reihan, A., Koltsova, T., Kriauciuniene, J., Lizuma, L., Meilutyte-Barauskiene, D., 2007. Changes in water discharges of the Baltic states rivers in the 20th century and its relation to climate change. *Nord Hydrol.* 38 (4–5), 401–412.
- Reihan, A., Loigu, E., 2007. Recent trends in water discharges of Estonian rivers. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, pp. 385–391, Helsinki, Finland, ISBN 978-952-11-2790-8.
- Roald, L.A., Hisdal, H., Beldring, H., 2007. Floods and droughts in a changing climate in Norway. In: *Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water*, Helsinki, Finland, pp. 392–397. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Smakhtin, V.U., 2001. Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol.* 240, 147–186.
- Todorovic, M., 2007. Monthly climatic water balance of the Apulia region (Southern Italy): analysis of historical weather data and projections for the 21st century. In: *Proceedings of the Third international conference on climate and water*, Helsinki, Finland, pp. 463–469. ISBN 978-952-11-2790-8.
- Tolasz, R., Miková, T., Valeriánová, A., Voženílek, V. (Eds.), 2007. Climate Atlas of Czechia. Czech Hydrometeorological Institute and Palacký University Olomouc, 255pp.
- von Storch, H., 1995. Misuses of statistical analysis in climate research. In: Von Storch, H., Navarra, A. (Eds.), *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*, vols. 11–26. Springer-Verlag, Berlin.

Článek 6

FIALA, T. (2009): Variabilita nedostatkových objemů na českých tocích ve vztahu k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí. VTEI, 51, mimoř. č. 2009, VÚV T.G.M., Praha, str. 16–19.

Variabilita nedostatkových objemů na českých tocích ve vztahu k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí

Variability of Deficit Volumes in Czech Rivers and Their Relationship to Physical-geographical Catchment Characteristics

Autor: RNDr. Theodor Fiala

Adresa: Český hydrometeorologický ústav

Na Šabatce 17

143 06 Praha 4 – Komořany

&

Výzkumný ústav vodohospodářský TGM

Podbabská 2582/30

160 00 Praha 6

ANOTACE

Nedostatkové objemy vody určené hranicí M-denního průtoku Q_{330} byly analyzovány z hlediska své velikosti a variability. Dále byly zkoumány roční délky trvání průtoku menšího nebo rovno Q_{330} . Časové řady všech charakteristik byly testovány modifikovaným Mann-Kendallovým testem na přítomnost trendu. Ve vybraných povodích byly vypočteny závislosti nedostatkových objemů na fyzicko-geografických charakteristikách. Byla rovněž odvozena regresní rovnice umožňující výpočet průměrného nedostatkového objemu povodí z hodnot Q_{330} , plochy povodí a variačního koeficientu průměrných denních průtoků.

ANNOTATION

Deficit volumes delimited by the M-day discharge Q_{330} threshold were analysed for their magnitude and variability. Further, annual sums of days with discharge equal or smaller than Q_{330} were examined. Time series of all characteristics were tested for trends with the modified Mann-Kendall test. In selected catchments, correlations of the deficit volumes and physical-geographical characteristics were calculated. An equation was derived that allows to estimate the mean annual deficit volume of a catchment using the Q_{330} discharge, catchment area and the variation coefficient of mean daily discharges.

KLÍČOVÁ SLOVA: nedostatkové objemy, Q_{330} , fyzicko-geografické charakteristiky, korelace, statistika.

KEY WORDS: *deficit volumes, discharge Q_{330} , physical-geographical characteristics, correlation, statistics.*

1. Úvod

Při nedostatku či úplné absenci srážek nastává v povodí zmenšení povrchového odtoku a pokles hladin vod v jezerech a nádržích. Toto tzv. meteorologické sucho ovšem neovlivní jen povrchové, nýbrž i podzemní vody. Dochází ke snižování hladin podzemních vod, následnému zmenšení základního odtoku a poklesu vydatnosti pramenů. Všechny tyto projevy lze označit pojmem **hydrologické sucho** [1]. Meteorologické sucho vzniká kombinací nízkých srážek a vysoké teploty vzduchu. Propagace hydrologického sucha je kromě meteorologické příčiny určována celou řadou dalších faktorů, jako jsou vlastnosti půdy, land-use, topografie a geologie území.

Hydrologické sucho je zpravidla popisováno s využitím malých průtoků. V České republice se k popisu tradičně používají M-denní průtoky, a to nejčastěji Q_{330} , Q_{355} , Q_{364} a nejmenší průměrný denní průtok v roce. Příkladem je studie ČHMÚ [2], v které byly

testovány trendy výše zmíněných M-denních průtoků v období 1961–2005. Zahraniční práce kvantifikují sucho zpravidla na základě hodnot P-procentních průtoků, tj. průtoků, které jsou dosaženy nebo překročeny v průměru v P procentech případů. Obvykle se používají 70, 90, případně 95% průtoky označované Q70, Q90 resp. Q95. Příkladem je práce [3], v které se její autoři zabývali modelováním změny průtoků Q95 v Nizozemsku. Hladný et al. [4] zkoumali, jak by se při změně teploty vzduchu a úhrnu srážek změnil percentil Q90.

Nejmenší průměrné denní průtoky jsou veličinou, která může být zatížena relativně velkou chybou. Problémem může být krátkodobé antropogenní ovlivnění nebo může být minimum „způsobeno“ a zaznamenáno díky technické či mechanické závadě na limnigrafu. V hydrologických studiích se proto častěji využívají minima spočtená z klouzavých průměrů několika po sobě jdoucích denních hodnot. Nejčastěji se používají sedmidenní a třicetidenní klouzavé průměry. Například v Litvě zkoumali trendy a sezonalitu třicetidenních ročních minim [5]. Předpovědi vývoje průměrných ročních sedmidenních minim v Evropě se zabývali Dankers et al. [6]. Je zřejmé, že minimum odvozené z více hodnot do určité míry eliminuje krátkodobá ovlivnění či zaznamenání nesmyslné hodnoty.

Kromě analýzy hodnot malých průtoků je další možností, jak popsat vlastnosti sucha, vypočítat délku jeho trvání. Z dat průměrných denních průtoků je možné určit dny s průtoky pod zvolenou prahovou hodnotou a spočítat třeba jejich roční sumy. Kupříkladu jedna belgická studie se zabývala reakcí povodí na změnu klimatu způsobenou zdvojnásobením koncentrace CO₂. Hydrologické sucho bylo vymezeno současnou hodnotou Q95 a tento práh byl zachován pro predikované odtoky. Autoři pak porovnávali současné a budoucí počty dnů sucha [7].

Podobně jako se hydrologové zabývají testováním trendů průměrných průtoků, zkoumají se i trendy malých vod. V Kanadě testovali sezónní minima z klouzavých průměrů o různé délce a navíc pomocí různých testů trendu [8]. Hannaford a Marsh [9] se zabývaly ročními minimy sedmi- a třicetidenních klouzavých průměrů a také ročními délkami suchých období vymezených hodnotou Q70 a Q90. Všechny charakteristiky testovali na přítomnost trendu. Stejně jako v případě kanadské studie i v tomto případě byl jedním z vybraných testů Mann-Kendallův test.

2. Data

Pro analýzu nedostatkových objemů byly vybrány stanice, ve kterých průtoky nejsou, nebo jen velmi málo, ovlivněné lidskou činností. Kromě neovlivněnosti byla dalším kritériem výběru stanice nepřerušenosť pozorování ve sledovaném období. Zahrnuto bylo několik stanic, jejichž přemístění v období bylo statisticky nevýznamné. Příkladem jsou na Jizeře stanice Tuřice měřící do roku 1999 a od roku 2000 navazující stanice Tuřice-Předměřice, které mají prakticky totožné plochy povodí a průměrné průtoky, takže jejich spojením vznikne homogenní řada. Dohromady bylo využito dat z 82 vodoměrných stanic. Data poskytl ze své databáze Český hydrometeorologický ústav.

Roční hodnoty nedostatkových objemů byly spočítány z dat průměrných denních průtoků za období 1961–2005 programem HyStat. Vstupními údaji jsou kromě denních průtoků také plochy povodí vybraných stanic. Nedostatkové objemy jsou programem automaticky přepočítávány na plochy povodí, a proto jsou ihned srovnatelné mezi různě velkými povodími. Program umožňuje zadání prahového průtoků, na jehož základě pak vybírá období s průtoky pod tímto prahem. Výstupem jsou roční sumy počtů dnů, kdy průměrný denní průtok podkročil prahovou hodnotu, a roční hodnoty nedostatkových objemů, tj. rozdílů mezi prahovým průtokem a skutečně se vyskytnuvšími podprahovými průtoky. Program zároveň umožňuje zvolit si libovolné datum začátku roku, což je pro analýzy sucha výhodné.

Data o fyzicko-geografických charakteristikách povodí byla získána z několika zdrojů. Sklonitost povodí byla vypočtena z digitálního modelu terénu. Údaje o zastoupení různých krajinných pokryvů byly odvozeny z databáze CORINE Landcover. Informace o množství jílu v půdě a nepropustnosti půdy jsou součástí gridové vrstvy vytvořené a poskytnuté Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd (VÚMOP). Hodnoty za jednotlivá povodí byly vypočteny v prostředí ArcGIS.

3. Metodika

Identifikovat sucho můžeme na základě hodnot, které jsou z dlouhodobého hlediska podnormální. Hydrologické sucho je počítáno z parametrů získávaných při měření v hydrologické síti. Při výpočtech se proto uplatňují data o průtocích, vydatnostech pramenů a změnách hladin v jezerech, nádržích, studnách a vrtech. Důležitým krokem je zvolení vhodné prahové hodnoty. Pokud je vybraný práh příliš nízký, podkročí ho jen extrémní sucha a ostatní významná sucha mohou být zanedbána. Opačný případ vede k výběru všech období, tj. i těch, která byla krátká a nedůležitá.

Prahovou hodnotou u vodních toků bývají, jak bylo uvedeno výše, nejčastěji p-procentní a m-denní průtoky. V této práci byl na každé stanici vzat jako prahová hodnota m-denní průtok Q_{330} z období 1961–2005. Představuje množství vody, které je dosaženo nebo překročeno 330 dní v roce. Odpovídá přibližně p-procentnímu průtoku Q_{90} . Přirozená akumulace vody v povodí je tvořena podzemními vodami, údaje o ní však bohužel nejsou celoplošně zpracovány. Výtok vody z podzemních zásobáren (kolektorů) je označován jako základní odtok. Základní odtok přispívá k celkové vodnosti povrchového toku, ovšem tuto složku lze jen těžko z celového odtoku separovat a přesně vyčíslit. V hydrologii se – s určitým zjednodušením – jako ukazatel hranice základního odtoku používá průtok Q_{330} . Je možné tedy konstatovat, že období poklesu průtoku pod Q_{330} značí stav, kdy jsou zásoby povrchové a podpovrchové vody vyčerpány a vodní tok je zcela saturován podzemní vodou.

Při poklesu průtoku pod úroveň Q_{330} lze vymezit množství vody, které do této úrovně chybí. Chybějící množství vypočítáme jako rozdíl průtoku Q_{330} a aktuálního průtoku násobený časem, po který nebyla úroveň Q_{330} dosažena. Integrál tohoto rozdílu náležející jednomu hydrologickému roku udává roční sumu nedostatkových objemů. Takto vypočtený nedostatkový objem pak byl vyjádřen v milimetrech na plochu povodí, aby byly hodnoty mezi sebou srovnatelné.

Roční hodnoty jsou v hydrologii klasicky odvozovány za období začínající 1. listopadem a končící 31. říjnem. V této studii byl za začátek hydrologického roku zvolen 1. duben. Jarní měsíce jsou typicky obdobím velké vodnosti, a proto zvolený začátek zaručuje, že se jedno období sucha nerozdělí do dvou různých hydrologických roků. Proto pokud je v článku uváděn např. nedostatkový objem za rok 2000, jedná se o objem za období 1. 4. 2000 až 31. 3. 2001.

Kromě ročních hodnot nedostatkových objemů pod průtokem Q_{330} (dále označované V_{330}) a ročních sum dnů s průtokem pod Q_{330} (dále označované D_{330}) byly pro studii vypočteny další charakteristiky. U každé stanice byl vypočten koeficient variace nedostatkových objemů V_{330} ($CV_{V_{330}}$), koeficient variace dnů D_{330} ($CV_{D_{330}}$) a tzv. $Q_{330\text{specif.}}$, což je poměr průtoku Q_{330} k ploše povodí. Uvedené charakteristiky nedostatkových objemů byly porovnávány s následujícími charakteristikami povodí:

Plocha
Dlouhodobý průměrný průtok
Průměrná nadmořská výška
Průměrný roční úhrn srážek
Průměrná roční výška potenciální evapotranspirace
Průměrná roční odtoková výška
Koeficient variace průměrných denních průtoků
K99, tj. 99procentní průtok dělený dlouhodobým průměrným průtokem
Lesnatost
Plocha jehličnatých lesů
Plocha listnatých lesů
Plocha městské zástavby
Plocha orné půdy
Plocha luk
Průměrné množství jílů v půdě
Nepropustnost půd
Průměrná hodnota CN křivky
Sklonitost

Pro identifikaci závislostí byly vypočteny korelační koeficienty nedostatkových objemů a výše uvedených charakteristik povodí. V programu STATISTICA byly také odvozeny regresní rovnice, které umožňují výpočet nedostatkových objemů z fyzicko-geografických charakteristik povodí.

Nedostatkové objemy byly testovány na přítomnost trendu. Bylo použito modifikovaného Mann-Kendalova testu trendu. Tento test je často využíván při zpracování hydrologických a meteorologických dat. Jedná se o neparametrický test, a tudíž histogram dat nemusí odpovídat některému ze statistických rozdělení. Oproti základnímu Mann-Kendalovu testu nabízí jeho modifikovaná verze nejprve test autokorelace prvního řádu. Pokud je v časové řadě dat autokorelace nalezena, je nejprve odstraněna a test proběhne následně na upravených datech. Časové řady byly testovány a vyhodnoceny na dvou úrovních, a to na 0,1 a 0,05 (tj. pravděpodobnost přítomnosti trendu 90 resp. 95 %).

4. Výsledky a diskuze

Roční nedostatkové objemy vyjádřené v milimetrech na plochu povodí se ve zkoumaných povodích pohybují od 0,2 do 8,1 mm (viz obr. 1). Tento rozsah odpovídá objemu od 200 do 8100 m³/km². Nejmenší hodnota připadá jihomoravskému povodí Radějovky, největší patří šumavskému povodí Vydry po Modravu. Průměr nedostatkových objemů činí 2,1 mm (210 m³/km²). Z mapy vyplývá, že vysoké hodnoty V330 připadají na povodí, která leží ve vyšších nadmořských výškách, mají vysoké úhrny srážek a relativně malou potenciální evapotranspiraci. Jsou to proto povodí s dostatkem vody, s vysokou odtokovou výškou. To je patrné i z tabulky 1, ve které jsou uvedeny korelační koeficienty nedostatkových objemů a vybraných charakteristik povodí. Velikost nedostatkového objemu kladně koreluje s průměrným ročním úhrnem srážek (korelační koeficient je roven 0,9), s průměrnou roční odtokovou výškou (koeficient 0,95) a nejvíce se specifickým průtokem Q₃₃₀ (tj. průtokem Q₃₃₀ vyděleným plochou povodí), kde korelace dosahuje hodnoty 0,96. Naopak nejvíce negativně korelují V330 s průměrnými ročními výškami potenciální evapotranspirace, takže s rostoucími hodnotami evapotranspirace klesají hodnoty nedostatkových objemů.

Tab. 1: Korelační koeficienty V330, CV_{V330} a CV_{D330} s vybranými charakteristikami povodí

Charakteristika povodí	V330	CV _{V330}	CV _{D330}
Plocha povodí	-0.24	-0.19	-0.29
Dlouhodobý průměrný průtok	0.26	0.05	-0.21
Nadmořská výška	0.81	0.24	-0.01
Průměrný roční úhrn srážek	0.90	0.28	0.05
Průměrná roční výška potenciální evapotranspirace	-0.74	-0.21	-0.08
Průměrná roční odtoková výška	0.95	0.33	0.09
CV	-0.41	-0.23	-0.14
K99	0.31	0.24	0.24
Lesnatost	0.39	0.15	0.18
Jehličnaté lesy	0.41	0.23	0.20
Listnaté lesy	-0.04	-0.12	-0.05
Městská zástavba	-0.30	-0.02	-0.06
Orná půda	-0.59	-0.16	-0.08
Louky	0.06	-0.07	-0.13
Množství jílů v půdě	-0.46	0.01	0.08
Nepropustnost	-0.40	-0.08	-0.01
CN	-0.35	-0.19	-0.17
Sklonitost	0.52	0.00	0.03
Q _{330specif.}	0.96	0.46	0.18

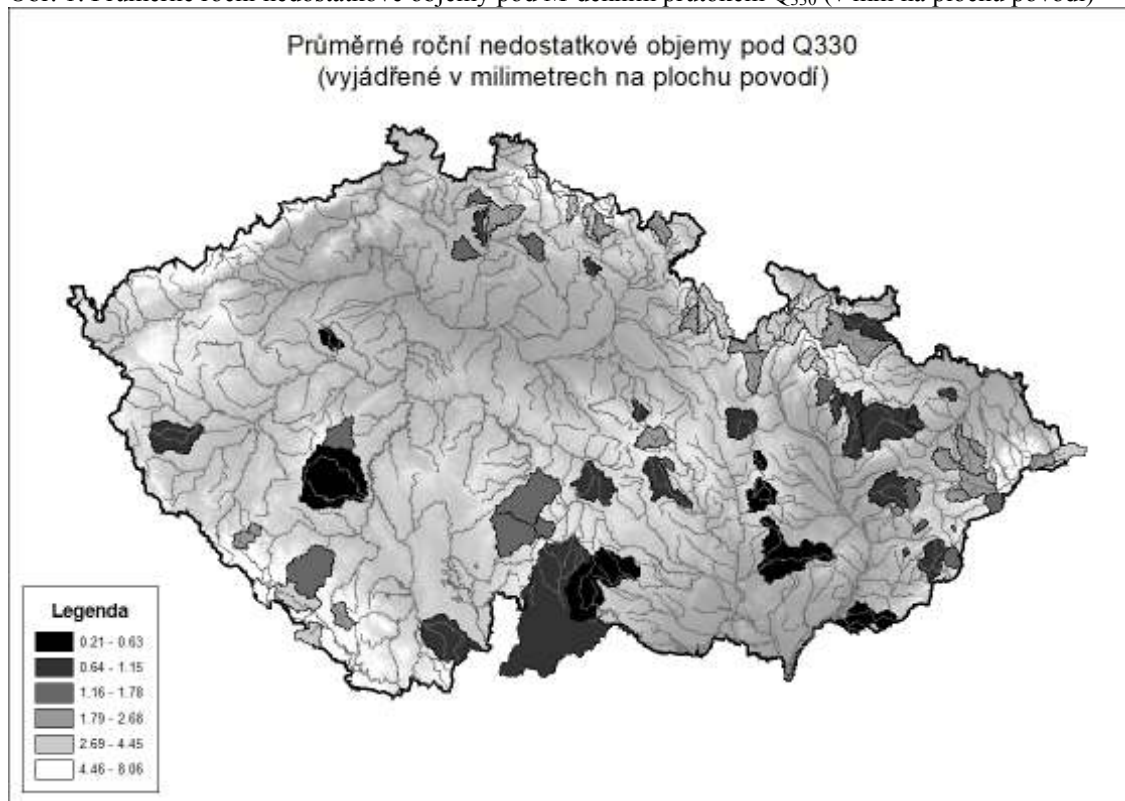
Těsnost závislosti se projevila při výběru regresní rovnice, která nejlépe popisuje průměrný roční nedostatkový objem. V330 kladně koreluje s procentuálním podílem lesů, a to především jehličnatých, či sklonitostí a naopak záporně koreluje s podílem orné půdy a nepropustností půdy. Ovšem tyto vazby nejsou tak těsné, jako závislosti na srážkových úhrnech či průměrné roční odtokové výšce. Nejvíce V330 koreluje s Q_{330specif.}, a proto jeho hodnoty vstoupily do rovnice. Zbylý rozptyl hodnot koreloval s variačním koeficientem. Proto má výsledná rovnice tvar:

$$V330 = 578,07 * (Q_{330specif.}) + 0,7 * (CV) - 0,97$$

Pro výpočet V330 je tedy nutné znát koeficient variace průměrných denních průtoků, plochu povodí a průtok Q₃₃₀. Hodnoty vypočtené regresní rovnicí korelovaly s reálnými hodnotami velmi těsně (korelační koeficient 0,97). Koeficient determinace byl roven 0,94 a rovnice tak vypočítá hodnotu velmi přesně.

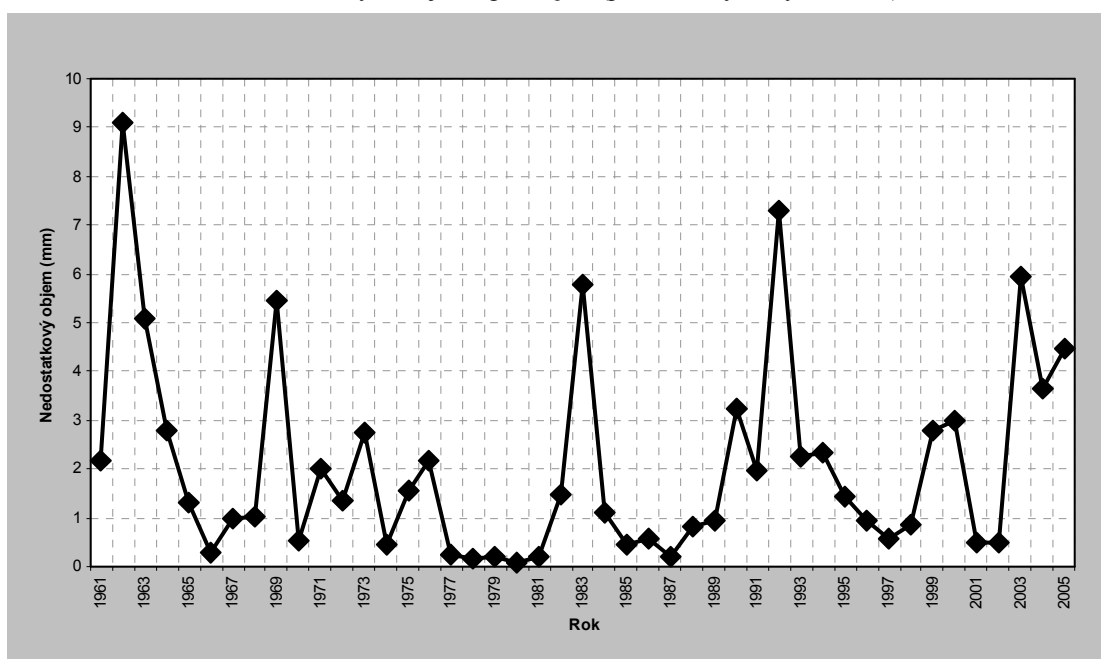
Ač by se mohlo zdát, že největší nedostatky vody připadají na povodí v horských oblastech a že jsou tato povodí nejvíce náchylná k suchu, ve skutečnosti tomu tak není. Jsou to totiž zároveň povodí s dostatkem srážek a vysokou odtokovou výškou. Podíl výšky nedostatkového objemu k celkové roční odtokové výšce dává lepší představu o tom, jaký význam má V330 vůči celkovému odtoku. Průměrně V330 činí pouze 0,5 % odtokové výšky. Ve sledovaných povodích se tento podíl pohybuje od 0,2 do 1,0 %. Nejvyšší podíl přísluší Bělé, pravostrannému přítoku dolní Jizery, která má hodnotu V330 sice jen 1,4 mm, ovšem celková malá odtoková výška podíl nedostatkového objemu zvětšuje.

Obr. 1: Průměrné roční nedostatkové objemy pod M-denním průtokem Q_{330} (v mm na plochu povodí)



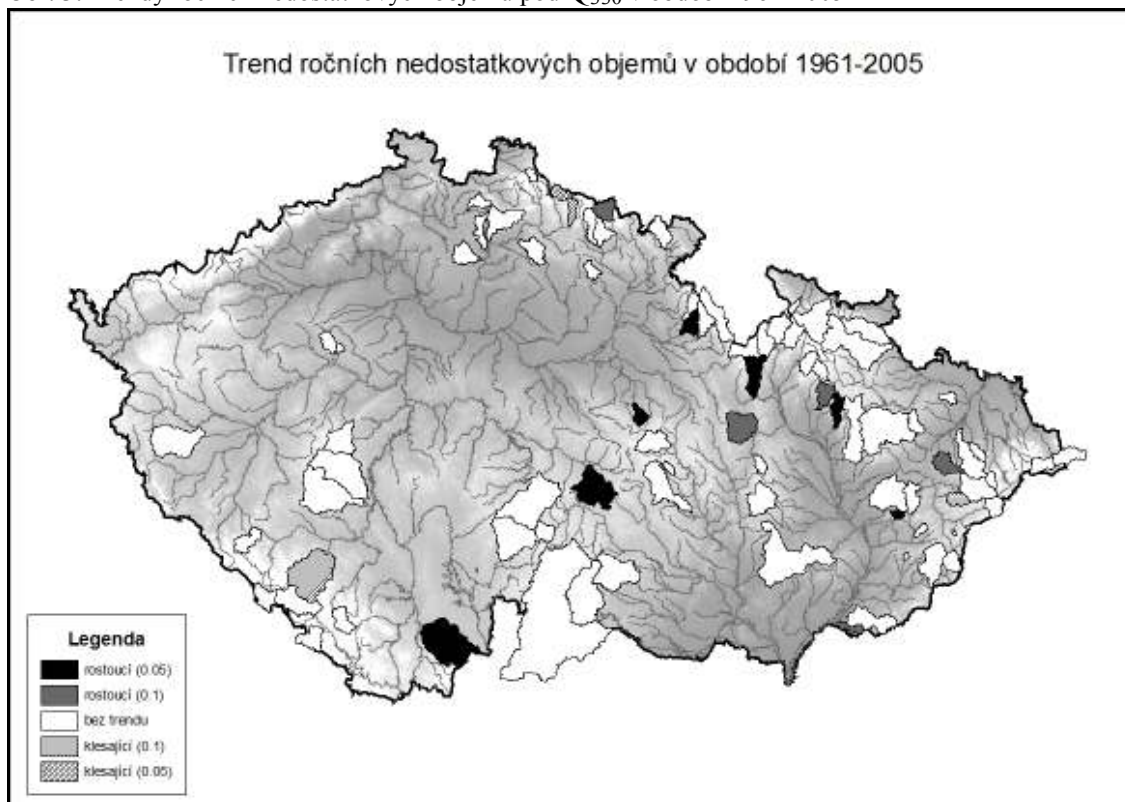
Chod průměrných nedostatkových objemů je zachycen na obr. 2. V grafu jsou dobře identifikovatelné roky sucha, které odpovídají odtokově podprůměrným rokům, jako byly například roky 1963, 1983, 1992 a 2003. Zajímavý je rok 1962, který u vybraných povodí vyšel z hlediska V_{330} jako rekordní, z hlediska ročního odtoku vody byl ovšem průměrný. Z křivky za celé období není zřejmý žádný trend směrem k větším či menším hodnotám V_{330} , ovšem zdá se, že nedostatkové objemy se od počátku šedesátých do osmdesátých let zmenšovaly a od té doby opět s několika výkyvy rostou.

Obr. 2: Chod ročních nedostatkových objemů pod Q_{330} (průměr z vybraných stanic)



Nevýraznost trendů nedostatkových objemů dokládají výsledky modifikovaného Mann-Kendallova testu, kterým byly identifikovány časové řady V330 se statisticky významným trendem. Výsledky testu jsou zobrazeny v mapě na obr. 3. Ze sledovaných povodí byl jen v necelých 20 % případech zjištěn trend statisticky významný na hladině pravděpodobnosti 0,1. Na hladině 0,05 to bylo méně než 10 % případů. V povodích se signifikantním trendem bylo plných 75 % případů s trendem klesajícím. Jejich počet je ovšem jen o málo vyšší než by byl počet stanic s trendem odvozený z náhodného výběru.

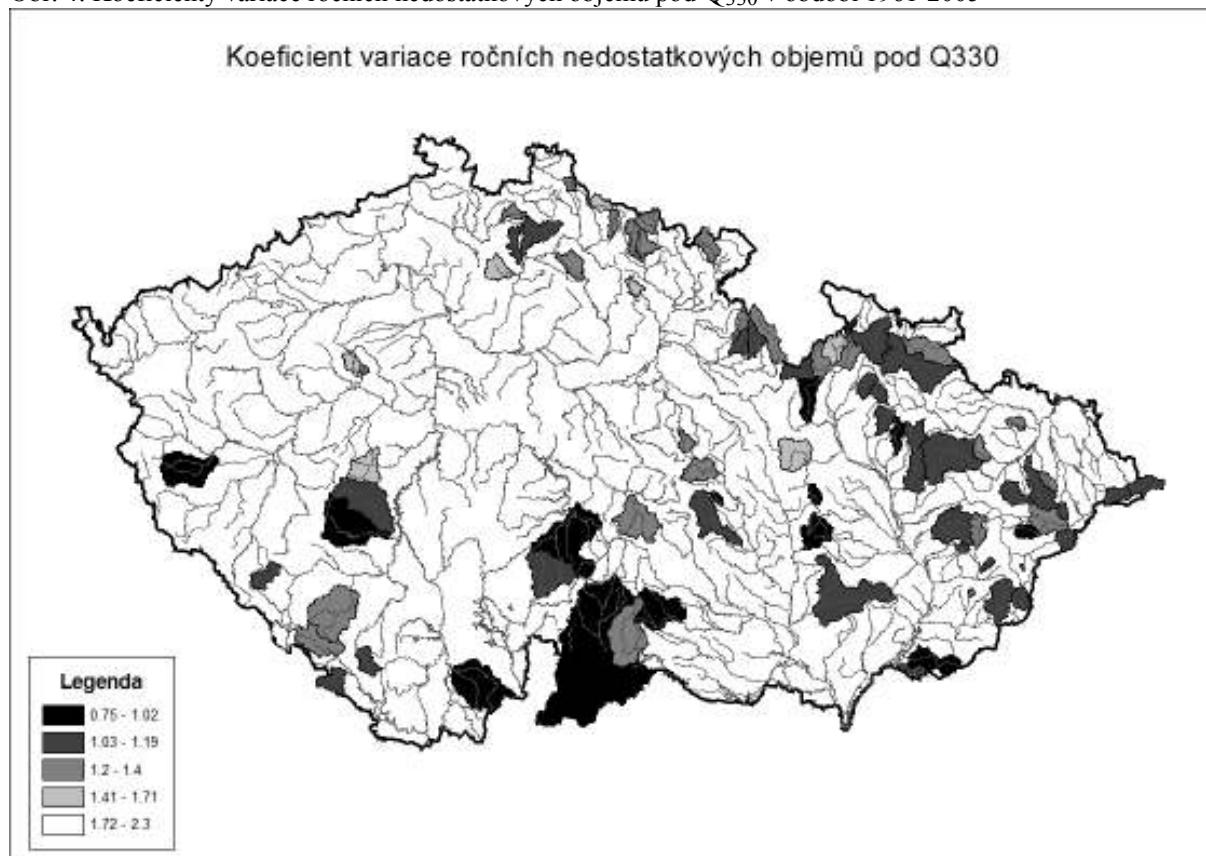
Obr. 3: Trendy ročních nedostatkových objemů pod Q_{330} v období 1961-2005



Velikosti ročních nedostatkových objemů jsou velmi variabilní, což je patrné již z grafu na obr. 2. Koeficienty variace V330 se u sledovaných stanic pohybují od 0,75 do 2,30 (viz obr. 4). Nejméně rozkolísané V330 lze najít na některých povodích na Vysočině, v jižních Čechách nebo v povodí Moravy. Nejproměnlivější jsou nedostatkové objemy na horských povodích (kromě Beskyd) a ve východních Čechách. Z rozložení hodnot CV_{V330} nevyplývá zřejmá vazba na některou fyzicko-geografickou charakteristiku povodí. Korelační koeficienty se většinou pohybují do hodnoty 0,3. Kladně korelují hodnoty Q_{330} přepočtené na plochu povodí ($Q_{330\text{specif.}}$), srážkové úhrny, odtoková výška a hodnota K99. Záporně koreluje koeficient korelace průměrných denních průtoků a evapotranspirace. Z toho lze soudit, že větší rozkolísanost nedostatkových objemů se vyskytuje v povodích s dostatkem vody a vyrovnanějším odtokem, což je třeba příklad výše zmíněných horských povodí nebo povodí ve východních Čechách.

Podobně byly zhodnoceny také koeficienty variace ročních počtů dnů s průtokem pod Q_{330} . Ty korelují s vybranými charakteristikami velmi podobně jako koeficienty variace V330 (korelační koeficient CV_{V330} a CV_{D330} je roven 0,7). Nejvíce rozkolísané jsou D330 v Krkonoších a Jeseníkách a naopak nejméně v povodích, která leží v nižších nadmořských výškách (například v jižní části Vysočiny nebo na dolním povodí Moravy).

Obr. 4: Koeficienty variace ročních nedostatkových objemů pod Q_{330} v období 1961-2005



V dlouhodobém pohledu se průměrný denní průtok menší než Q_{330} vyskytne průměrně 35-36krát za rok, což vyplývá z jeho definice. Délky trvání v jednotlivých letech ovšem mohou být značně rozkolísané podobně jako variabilita nedostatkových objemů. Nezřídka v průběhu roku průtok pod Q_{330} vůbec neklesne, v suchém roce může naopak přetrvávat řadu týdnů či dokonce měsíců.

Podle ročního počtu D₃₃₀ (průměr za sledované stanice) byl nejsušším rokem rok 1992 s průměrným počtem 101 dnů s průtokem menším nebo rovným Q_{330} . Z hlediska nedostatkových objemů byl tento rok až druhý za rokem 1962, z čehož vyplývá, že v roce 1992 trvaly malé průtoky sice delší dobu, ale nepodkročily hranici Q_{330} o tolik, jako průtoky v roce 1962. Rok 1962 byl z pohledu délky trvání až třetí, překonal ho ještě rok 2003 s počtem 96 dnů. U konkrétního povodí je rekordem 272 dnů, po které průtok nepřekročil hodnotu 330denní vody na Zábrdce v roce 1974.

Opačným extrémem byl rok 1980, v kterém se průměrně vyskytly pouhé tři dny s průtokem pod Q_{330} . U 84 % stanic průtok na Q_{330} v roce 1980 vůbec neklesl, přičemž v běžném roce této hladiny v průměru dosáhne 30 % stanic. Co se týče počtu roků ve sledovaném období (1961-2005), kdy průtok na povodí na úroveň Q_{330} neklesl, bylo jich v průměru 13 až 14, tj. přibližně každý třetí nebo čtvrtý rok. Počty těchto „vodních“ roků se povodí od povodí lišily. V některých povodích průtok poklesl na nebo pod Q_{330} téměř v každém roce. Typická jsou pro to například beskydská povodí, kde ze zkoumaných 45 let pouze v 5 až 7 letech průtoky neklesly na úroveň 330denní vody. V povodí Otavy bylo takových roků 12–16. U dvou povodí neklesly průtoky na Q_{330} ve více než 50 % případů: na Zábrdce ve 23 ze 45 let a na Radějovce dokonce ve 27 ze 45 let.

5. Závěr

Velikosti nedostatkových objemů pod hranicí m-denního průtoku Q_{330} tvoří pouze zlomek z celkového objemu vody odtékající z povodí. Kromě absolutní velikosti je proto vhodné vyhodnocovat také délky trvání malých průtoků, případně průměrnou velikost podkročení prahové hodnoty (tzv. intenzitu sucha). Délka trvání vyjadřuje, po jakou dobu v řece teklo tak málo vody, že mohly být omezeny odběry vody či vypouštění odpadních vod.

V této práci byl za prahovou hodnotu vybrán m-denní průtok Q_{330} . Uvedený metodický postup ovšem umožňuje vypočítat charakteristiky nedostatkových objemů pro jakoukoliv jinou prahovou hodnotu, ať už by to byl m-denní nebo p-procentní průtok.

Z hlediska přirozeného vývoje vodnosti českých toků v běžném roce je zřejmé, že jediná prahová hodnota vymezí období sucha v části roku, kdy z povodí odtéká nejméně vody, tedy na konci léta a na podzim, případně v horských povodích v nejchladnější části zimy. Jednotný práh je proto vhodný pro vyhodnocení ročních nedostatkových objemů a délek trvání malých průtoků. Pro sezónní srovnání je nutné zvolit prahovou hodnotu pro každou sezónu nebo měsíc a v nich nedostatkové objemy analyzovat. Je totiž možné, že se například budou malé průtoky v zimě zvětšovat v důsledku zvyšování teploty vzduchu, kdy bude více srážek padat ve formě deště a hned odtékat. Naopak v létě by zvýšení teploty a setrvalý stav srážkových úhrnů – což jsou současné odhady vývoje klimatu na našem území – mohly způsobit zmenšování průtoků. Proto je nutné malé průtoky hodnotit pro každou sezónu zvlášť, což bude náplní naší další práce.

Seznam použitých zkratk

Q_{330} – průměrný denní průtok, který je dosažen nebo překročen průměrně 330 dnů v roce

V_{330} - roční hodnota nedostatkového objemu pod m-denním průtokem Q_{330}

D_{330} - roční suma dnů s průtokem pod Q_{330}

$CV_{V_{330}}$ - koeficient variace nedostatkových objemů V_{330}

$CV_{D_{330}}$ - koeficient variace ročních hodnot dnů D_{330}

$Q_{330\text{specif.}}$ - podíl průtoku Q_{330} ku ploše povodí.

K_{99} - 99procentní průtok dělený dlouhodobým průměrným průtokem

Poděkování

Tento článek byl připraven z výsledků projektu sponzorovaného Ministerstvem životního prostředí (číslo projektu SP/1a6/125/08). Autor dále děkuje ČHMÚ za poskytnutí dat a University du Québec za programový kód Mann-Kendallovu testu trendu.

LITERATURA

- [1] PALMER, W., C. (1965): Meteorological Drought. U.S. Department of Commerce, Research paper No. 45, 58 s.
- [2] KULASOVÁ, B., BOHÁČ, M., FIALA, T. (2008): Climate change impacts on low flows. Sborník příspěvků z workshopu Adolfa Patery 2008, Praha, str. 95-102.
- [3] QUERNER, E., P., VAN BAKEL, P., J., T., MULDER, H., M. (2007): Water management innovation for meeting climate change effects and European Water Framework Directive targets: Pilot study Lankheet. Proceedings of the Third international conference on climate and water. Helsinki, ISBN 978-952-11-2790-8, str. 379-384.
- [4] HLADNÝ, J. et al. (1996): Dopady možné změny klimatu na hydrologii a vodní zdroje v České republice. Národní klimatický program, sv. 20, ČHMÚ, Praha, 138 s.
- [5] KRIAUCIUNIENE, J., KOVANEKOVIENTE, M., MEILUTYTE-BARAUSKIENE, D. (2007): Changes of the dry period runoff in Lithuania. Proceedings of the Third international conference on climate and water. Helsinki, ISBN 978-952-11-2790-8, str. 314-319.
- [6] DANKERS, R. et al. (2007): Future changes in flood hazard in Europe. Proceedings of the Third international conference on climate and water. Helsinki, ISBN 978-952-11-2790-8, str. 115-120.
- [7] GELENS, D, ROULIN, E. (1998): Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios Journal of Hydrology, vol. 210, 1-4, str. 242-258.
- [8] KHALIQ, M., N., OUARDA, T., B., M., GACHON, P., SUSHAMA, L. (2008): Temporal evolution of low-flow regimes in Canadian rivers. Water Resources Research, vol. 44, W08436, str. 1-19.
- [9] HANNAFORD, J., MARSH, T. (2006): An assessment of trends in UK runoff and low flows using a network of undisturbed catchments. International Journal of Climatology, vol. 26, str. 1237-1253.